ESTUDIO BINACIONAL SOBRE EL ACUÍFERO TRANSFRONTERIZO SANTA CRUZ

Informe Final 2026

THE UNIVERSITY OF ARIZONA

INTERNATIONAL BOUNDARY AND WATER COMMISSION · COMISIÓN INTERNACIONAL DE LIMITES Y AGUAS

USGS science for a changing world

UNIVERSIDAD DE SONORA 1942

CONAGUA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

AUTORIDAD

Este estudio se llevó a cabo por México y los Estados Unidos de conformidad con la resolución 6 del Acta No. 242 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos (CILA), intitulada “Solución Permanente y Definitiva al Problema Internacional de la Salinidad del Río Colorado,” con fecha 30 de agosto de 1973; y el "Informe Común de los Ingenieros Principales Referente al Proceso de Cooperación Conjunta México-Estados Unidos para el Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos", de fecha 19 de agosto de 2009.

FINANCIAMIENTO

Este estudio fue financiado por la Comisión Nacional de Agua de México, la Comisión Internacional de Límites y Aguas, de Estados Unidos y México, el Servicio Geológico de Estados Unidos, y el Centro de Investigaciones de Recursos Hídricos de la Universidad de Arizona.

ORGANISMOS PARTICIPANTES

Comisión Internacional de Límites y Aguas
Entre México y Estados Unidos

Por México:
Comisión Nacional del Agua
Universidad de Sonora

Por los Estados Unidos:
Servicio Geológico de los Estados Unidos
Centro de Investigación de Recursos de Hídricos de la Universidad de Arizona

Autores: J.I. Minjárez Sosa, J.B. Callegary, E.M. Tapia Villaseñor, L.M. Wildermuth, R. Monreal, F.J. Grijalva Noriega, F. Gray, L.M. Norman, C.J. Eastoe, L. López Arriola, M.B. Cruz Ayala, J. Cederberg, G.C. Treviño Macías, L.A. Oroz Ramos, S.B. Megdal

Referencia sugerida: Minjárez Sosa, J.I., Callegary, J.B., Tapia Villaseñor, E.M., Wildermuth, L.M., Monreal, R., Grijalva Noriega, F.J., Gray, Norman, L.M., F., Eastoe, C.J., López Arriola, L., Cruz Ayala, M.B., Cederberg, J., Treviño Macías, G.C., Oroz Ramos, L.A., Megdal, S.B., Estudio Binacional sobre el Acuífero Transfronterizo del Río Santa Cruz: Comisión Internacional de Límites y Aguas

GRUPO DE ESTUDIO BINACIONAL

Por la Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y Estados Unidos:
- Adriana Beatriz Carolina Resendez Maldonado, Comisionada, Sección Mexicana
- Luis Antonio Rascón Mendoza, Ingeniero Principal, Sección Mexicana
- Manuel Alejandro Morales Galvan, Coordinador del Proyecto, Sección Mexicana
- Blanca Selenis Cabello Ribota, Coordinador del Proyecto, Sección Mexicana
- Jesús Quintanar, Representante en Nogales, Sonora, Sección Mexicana
- Francisco José Luján Cuadras, Representante en Nogales, Sonora, Sección Mexicana

- William C. McIntosh, Comisionado, Sección Estadounidense
- Ramon Macías III., Ingeniero Principal, Sección Estadounidense
- Gilbert Anaya, Coordinador del Proyecto, Sección Estadounidense
- John Light, Gerente del Área de Operaciones-Nogales, Sección Estadounidense

Por la Comisión Nacional del Agua:
- Efraín Morales López, Director General
- Humberto Juan Francisco Marengo Mogollón, Subdirector General Técnico
- Hugo Estrada Arroyo, Gerente de Aguas Subterráneas
- María Fernanda Angulo Escotto, Subgerente de Exploración y Monitoreo Geohidrológico
- Melissa Urania Barrera Vásquez
- Santiago Hilario Pérez

Por el Organismo Cuenca Noroeste – Comisión Nacional del Agua:
- Rodolfo Castro Valdez, Director General del Organismo Cuenca Noroeste
- Graciela Catalina Treviño Macías, Directora Técnica del Organismo Cuenca Noroeste

Por la Universidad de Sonora:
- Ismael Minjárez Sosa, Investigador Principal
- Rogelio Monreal Saavedra
- Francisco Javier Grijalva Noriega
- Elia M. Tapia Villaseñor
- Lucas Antonio Oroz Ramos
- Lizeth López Arriola
- Marian Sosa Huerta

Por el Servicio Geológico de los Estados Unidos:
- Jamie Macy, Director (Interina), Centro de Investigación en Ciencias del Agua de AZ.
- James Callegary, Investigador Principal (Retirado)
- Libby Wildermuth, Investigador Principal
- Floyd Gray, Investigador Principal (Retirado)
- Jay Cederberg, Director Adjunto de Estudios (interino)
- Edyth Hermosillo (Exempleada)

Por la Universidad de Arizona Centro de Investigación de Recursos Hídricos:
- Sharon B. Megdal, Investigador Principal
- Elia M. Tapia Villaseñor
- Jacob D. Petersen-Perlman
- Mary Belle Cruz Ayala
- Christopher Eastoe

El grupo binacional reconoce la valiosa participación de un gran número de colaboradores técnicos y administrativos quienes de manera directa o indirecta participaron en el desarrollo de este estudio, ya sea a través de supervisión, trabajo de campo, impresión, edición, control administrativo, etc., o a través de valiosas contribuciones con información, ideas y comentarios sobre los resultados del estudio y sus interpretaciones. Los esfuerzos de la Universidad de Arizona fueron financiados por parte del Servicio Geológico de los Estados Unidos (autorizado por P.L. 109-448) número de adjudicación G17AC00439 y parcialmente por el Fondo de Iniciativas de Tecnología e Investigación del Centro de Investigación de Recursos Hídricos (WRRC). El uso de nombres comerciales, de empresas o de productos se realiza únicamente con fines descriptivos y no implica su respaldo por parte de los Gobiernos de México y de los Estados Unidos.

El equipo binacional también dedica este estudio a sus amigos Roberto Salmon Castelo, ex comisionado, y al representante de larga trayectoria de la CILA en Nogales, Sonora, el Ingeniero Jesús Quintanar. †

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ACRÓNIMOS 14

1. INTRODUCCIÓN 16
   1.1. Antecedentes 16
   1.2. Área de Estudio 18
   1.3. Objetivos del Estudio 23
   1.4. Estudios Previos y Monitoreo en proceso 23
   1.5. Entorno Socioeconómico Binacional 24
   1.6. Diferencias Institucionales en la Gestión del Agua en los Estados Unidos y México 27
   1.7. Trabajo Técnico Realizado 29
   1.8. Metodologías y Técnicas Aplicadas 30

2. FISIOGRAFÍA 37
   2.1. Introducción y Fuentes de Datos 37
   2.2. Provincias fisiográficas, topografía y accidentes geográficos 37
   2.3. Suelos 38
   2.4. Vegetación y Cobertura Terrestre 46
   Bibliografía 50

3. CLIMA E HIDROLOGÍA DEL AGUA SUPERFICIAL 52
   3.1. Introducción 52
   3.2. Climatología 53
   3.3. Sistema Hidrológico Superficial 64
   Bibliografía 72

4. MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL 75
   4.1. Modelo Geológico Regional 75
   4.2. Estratigrafía 76
   4.3. Geología Estructural 85
      4.3.1. Revisión de estudios geofísicos en la porción de Arizona del TSCAS 86
   4.4. Modelado Geofísico y Análisis de la Estructura de la Cuenca en la porción Sonorense del TSCAS88
   4.5. Características del Relleno Sedimentario 93
   4.6. Conclusiones 96
   Bibliografía 98

5. HIDROGEOLOGÍA 102
   5.1. Introducción 102
   5.2. Basamento Hidrogeológico 102
   5.3. Unidades Hidroestratigráficas 104

5.4. Definición del Sistema del Acuífero 105
5.5. Geología Estructural 108
5.6. Conclusiones 109
Bibliografía 111

6. PIEZOMETRÍA Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS 113
6.1. Introducción y Métodos 113
6.2. Inventario de Pozos y Datos del Nivel Freático 114
6.3. Extracción de Agua Subterránea 115
6.4. Análisis del Comportamiento Piezométrico 127
6.5. Parámetros Hidráulicos 132
6.6. Conclusiones 136
Bibliografía 137

7. HIDROGEOQUÍMICA 140
7.1. Introducción y métodos 140
7.2. Métodos 141
7.3. Normas de la Calidad del Agua 141
7.4. Aseguramiento de Calidad/Control de Calidad (QA/QC) 144
7.5. Acuíferos de las Tierras Altas del TSCAS 144
7.5.1. Introducción 144
7.5.2. Antecedentes 145
7.5.3. Controles químicos, estructurales y mineralógicos de la permeabilidad 146
7.5.4. Geoquímica de la meteorización 147
7.5.5. Geología y Geoquímica de las Montañas Patagonia 149
7.5.6. Hidrología y Ecología: Estudios Previos 153
7.6. Geoquímica de las Tierras Bajas: 154
7.6.1. Temperatura 156
7.6.2. pH 158
7.6.3. Alcalinidad 160
7.6.4. Conductividad Eléctrica 162
7.6.5. Iones Principales 165
7.6.6. Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales de la CILA 186
7.6.7. Compuestos Orgánicos 187

7.6.8. Microbios 188

7.7. Modelo Conceptual Geoquímico e Hidrológico utilizando Isótopos 188

7.7.1. Isótopos Estables en el Agua 189

7.7.2. Isótopoes de Sulfato 194

7.8. Conclusiones y trabajo futuro 195

Bibliografía 198

8. MODELOS CONCEPTUALES Y NUMÉRICOS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÓDINAMICO 208

8.1. Recarga y Descarga de Acuíferos 208

8.2. Trabajos anteriores 210

8.2.1. Modelos de Flujo de Agua Subterránea en Arizona (ADWR) 210

8.2.2. Modelos de Flujo de Agua Subterránea en Sonora (México) 210

8.3. Comportamiento Hidrodinámico Antes y Después del Desarrollo 213

8.3.1. Antes del Desarrollo 213

8.3.2. Después del Desarrollo 215

8.3.3. Modelo Actualizado del Área de Manejo Activa de Santa Cruz 219

8.3.4. Otros Modelos de Balance Hídrico (WBM) 220

8.4. Conclusiones 222

Bibliografía 224

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 227

9.1. Resumen y Observaciones Finales 227

9.2. Resumen de Hallazgos 227

9.2.1. Marco Geológico y Estructural 227

9.2.2. Clima e Hidrología Superficial 227

9.2.3. Hidrogeología 228

9.2.4. Niveles de Agua Subterránea y Parámetros Hidráulicos 228

9.2.5. Geoquímica 228

9.2.6. Modelación Conceptual y Numérica 229

9.3. Brechas Científicas y Limitaciones 229

9.4. Recomendaciones Científicas 230

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Cuencas Transfronterizas de Santa Cruz y San Pedro. (las líneas punteadas indican las subdivisiones de condados en EE. UU. y límites municipales en México). 17

Figura 1.2 Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz. 21

Figura 1.3 Subdivisiones Administrativas del Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz. 22

Figura 2.1 Provincias Fisiográficas en el Sistema Transfronterizo de Santa Cruz. 42

Figura 2.3 Tipo de suelo en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.....43

Figura 2.4 Vegetación en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (modificado de Wallace et al., 2011). 48

Figura 2.5 Cobertura del suelo en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (modificado de Villarreal et al., 2011). 49

Figura 3.1 Clima y Estaciones Meteorológicas en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.....54

Figura 3.2 Precipitación y temperatura media mensual para el período 1960-2022 en la estación de datos de NOAA NOGALES 6 N, número de estación USC00025924. 55

Figura 3.3 Precipitación y temperatura media anual para el período de 1960-2022 a 2017 en la estación de datos de NOAA NOGALES 6 N, número de estación USC00025924. Los datos fueron obtenidos del portal en línea de datos climáticos de NOAA (https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/).....55

Figura 3.4 Temperatura Promedio Anual en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.....58

Figura 3.5 Temperatura Máxima en el Mes más Cálido en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz. 59

Figura 3.6 Temperatura Mínima en el Mes más Frío en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.60

Figura 3.7 Precipitación Promedio Anual en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz. 61

Figura 3.8 Precipitación Promedio Mensual en el Mes de Enero en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz. 62

Figura 3.9 Precipitación Promedio Mensual en el Mes de Agosto en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz. 63

Figura 3.10 Red de Drenaje de Aguas Superficiales en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.69

Figura 3.11 Hidrograma ráster del caudal diario en el Río Santa Cruz en Lochiel, AZ hasta el final del año calendario 2020. 70

Figura 3.12 Hidrograma ráster del caudal diario en el Río Santa Cruz cerca de Nogales AZ hasta el final del año calendario 2020. 70

Figura 3.13 Hidrograma ráster del caudal diario en Arroyo Nogales en Nogales AZ hasta el final del año calendario 2020. 71

Figura 3.14 Hidrograma ráster del caudal diario en el Río Santa Cruz en Tubac AZ hasta el final del año calendario 2020. 71

Figura 4.1 Geología del TSCAS. 78

Figura 4.2 Estratigrafía del TSCAS. 79

Figura 4.3 Estudios de Gravimetría en el Acuífero Río Santa Cruz en México. 89

Figura 4.4 Mapa y sección transversal de la anomalía residual (A) y el perfil gravimétrico NS (B) a lo largo del Río Santa Cruz en el lado este de la porción de Sonora del TSCAS. 90

Figura 4.5 Mapa y sección transversal de la anomalía residual (A) y el perfil gravimétrico NS (B) a lo largo del Río Santa Cruz en el lado oeste de la porción de Sonora del TSCAS. 91

Figura 4.6 Mapa y sección transversal de la anomalía residual (A) y el perfil gravimétrico EO (B) a lo largo del Río Santa Cruz en el lado sur de la porción de Sonora del TSCAS. 92

Figura 4.7 Perfil EO de resistividad basado en TEM ubicado en la porción de Sonora del área de estudio a lo largo del Río Santa Cruz. 95

Figura 4.8 Perfil de resistividad basado en TEM ubicado en la parte de Sonora del área de estudio. 96

Figura 5.1 Sección transversal generalizada del Río Santa Cruz superior y de las unidades hidrogeológicas cerca del límite norte del TSCAS dentro de Arizona, tomada del perfil B-B' de la figura 3 de Anning y Leenhouts (2010), modificada de Nelson (2007). 103

Figura 5.2 Unidades Hidroestratigráficas en el TSCAS. 106

Figura 5.3 Perfil hidroestratigráfico interpretado (abajo) con base en el perfil de resistividad (arriba) en el borde suroeste de la Sierra San Antonio en el lado mexicano del TSCAS (Esto fue interpretado con base en los datos de la Figura 4.7). 107

Figura 6.1 Ubicación de Pozos en el TSCAS. 117

Figura 6.2 Ubicación de los pozos utilizados para los hidrogramas de aguas subterráneas en el TSCAS.118

Figura 6.3 Hidrogramas para pozos seleccionados en el TSCAS, mostrando profundidad del agua subterránea en metros en el eje izquierdo, y altitud en metros (NAD27) en el eje derecho (ADWR, 2025a) y Minjarez et al., (2011). 121

Figura 6.4 Extracciones anuales de agua subterránea entre 1985 y 2020 en el SCAMA (ADWR, 2020).122

Tabla 6.2 Volumen de concesiones y asignaciones del SCRAS en Mm^3 para el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024a). 123

Tabla 6.3 Volumen de concesiones y asignaciones del NAS en Mm3 para el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024b). 123

Figura 6.5 Concesiones y *asignaciones* anuales de aguas subterráneas entre 1995 y 2020 en el SCRAS en México (Fuente: CONAGUA-REPDA, 2022) (Tapia-Villaseñor et al., 2022). 123

Figura 6.6 Concesiones y asignaciones anuales de agua subterránea entre 1997 y 2020 en el NAS en México (Fuente: CONAGUA-REPDA, 2022) (Tapia-Villaseñor et al., 2022). 124

Figura 6.7 Extracción anual de agua subterránea en el TSCAS en México y Estados Unidos.....124

Figura 6.8 Extracción de agua subterránea y usos en el SCAMA en los Estados Unidos para el año 2023 (ADWR, 2024).....125

Figura 6.9 Extracción de agua subterránea y usos en el SCRAS en México en el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024a). 125

Figura 6.10 Extracción de agua subterránea y usos en el NAS en México en el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024b). 126

Figura 6.11 Profundidad al nivel estático del agua en el TSCAS para el año 2011, con algunos datos de 2012 incluida en la base de datos GWSI.....130

Figura 6.12 Profundidad al nivel estático del agua en el TSCAS para el año 2025. 131

Figura 6.13 Ubicación de pozos medidos a lo largo del SCRAS.....133

Figura 7.1 Geología de las Montañas Patagonia tomada de Vikre et al. (2014). Mapa geológico de las Montañas Patagonia, condado de Santa Cruz, Arizona. 150

Figura 7.2 Estudio geoquímico binacional en el TSCAS. 155

Figura 7.3 Temperatura de agua subterránea y superficial en el TSCAS. 157

Figura 7.4 pH del agua subterránea y superficial en el TSCAS.....159

Figura 7.5 Alcalinidad de agua subterránea en el TSCAS.....161

Figura 7.6 Conductividad específica en el TSCA.....164

Figura 7.7 Variabilidad espacial de las concentraciones de sodio en agua subterránea y superficial en el TSCAS. 167

Figura 7.8 Variabilidad espacial de las concentraciones de calcio en agua subterránea y superficial del STSCAS.....169

Figura 7.9 Variabilidad espacial de las concentraciones de magnesio en agua subterránea y superficial del TSCAS. 171

Figura 7.10 Variabilidad espacial de las concentraciones de Bicarbonato en agua subterránea y superficial del TSCAS 173

Figura 7.11 Variabilidad espacial de las concentraciones de Potasio en agua subterránea y superficial del TSCAS. 175

Figura 7.12 Variabilidad espacial de las concentraciones de cloruro en agua subterránea y superficial del TSCAS. 177

Figura 7.13 Variabilidad espacial de las concentraciones de sulfato en las aguas subterránea y superficial del TSCAS. 179

Figura 7.14 Diagramas de Stiff que muestran la composición iónica de las muestras de agua analizadas, expresada en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg). 181

Figura 7.15 Diagramas de stiff que muestran la composición iónica de las muestras de agua analizadas, expresada en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg). 182

Figura 7.16 Diagramas de stiff que muestran la composición iónica de las muestras de agua analizadas, expresada en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg). 183

Figura 7.17 Diagramas de stiff que muestran la composición iónica de las muestras de agua analizadas, expresada en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg). 185

Figura 7.18 Diagramas de stiff para pozos seleccionados, que muestran la ubicación en el mapa de los sitios de muestreo. 185

Figura 7.19 Gráfico de δ^2 H frente a δ^{18} O para las aguas superficiales de la cuenca alta del Río Santa Cruz. 191

Figura 7.20 Gráfico de δ^2 H frente a δ^{18} O para las aguas subterráneas (AG) de las Montañas Patagonia y las cuencas aluviales circundantes (San Rafael, Sonoita, valle del Río Santa Cruz, Sonora). 193

Figura 7.21 Gráfico de δ18 OSO4 frente a δ34 S para el sulfato disuelto en las aguas subterráneas (GW) y superficiales (SW) de las Montañas Patagonia y los acuíferos aluviales adyacentes. 195

Figura 8.1 Configuración espacial del Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (TSCAS) y el acuífero adyacente del Río Alisos.....209

Figura 8.2 Regiones modeladas dentro del Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (TSCAS).....212

Figura 8.3 Mapa que muestra la ubicación del Área de Manejo Activa (AMA) de Tucson en relación con el Sistema Acuífero Santa Cruz 214

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Población en las Principales Entidades de la Cuenca Transfronteriza de Santa Cruz 25
Tabla 3.1 Descarga Media Mensual (m^3/s) en el Río Santa Cruz en México. Aforo del Arroyo El Cajón: 1962-1976. 68
Tabla 3.2 Volumen Medio Mensual (miles de m3) en el Río Santa Cruz en México. Aforo del Arroyo El Cajón: 1962-1976..... 68
Tabla 6.1 Extracciones anuales del Área de Maneja Activo de Santa Cruz para el año 2023, en Mm3 (ADWR, 2024)..... 116
Tabla 6.2 Volumen de concesiones y asignaciones del SCRAS en Mm^3 para el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024a). 123
Tabla 6.3 Volumen de concesiones y asignaciones del NAS en Mm3 para el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024b). 123
Tabla 6.4 Volumen de agua utilizado por el subsistema de agua potable de la ciudad de Nogales, Sonora (OOMAPAS, 2025, comunicación escrita). 127
Tabla 6.5 Valores de transmisividad y conductividad hidráulica derivados de pruebas de acuífero en el SCRAS (Minjarez et al., 2011). 132
Tabla 7.1 Comparación de las normas mexicanas (NOM-127-SSA1-2021) y estadounidenses (EPA, 2016) sobre agua potable para determinados compuestos..... 142
Tabla 7.2 NOM-001-SEMARNAT-2021, límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales de uso público. 143
Tabla 7.3 Lista de métodos de la Norma Oficial Mexicana utilizados para analizar muestras de agua en Minjarez et al. (2011). 143
Tabla 7.4 Iones principales y MCL en el TSCAS. 165
Tabla 8.1 Comparación de los balances hídricos anuales derivados de modelos conceptuales y simulados en estado estacionario, para el área entre la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales (PITAR) y Amado, Arizona, para el período anterior al desarrollo y para el período 1997-2002 (modificado a partir de Nelson, 2007). Todos los valores están expresados en hectómetros cúbicos por año (hm3 /año)..... 215
Tabla 8.2 Componentes del modelo de balance hídrico del Acuífero Nogales en Sonora (NAS) y del Acuífero Río Santa Cruz en Sonora (SCRAS) de la CONAGUA para el año 2024 (CONAGUA, 2024a y CONAGUA, 2024b). 216
Tabla 8.3 Comparación de los balances hídricos anuales de los modelos conceptuales y numéricos en estado estacionario para el área de las microcuencas, basados en los años hidrológicos 1998-2002 (Erwin, 2007). Todos los valores están expresados en hectómetros cúbicos por año. 218

LISTA DE ACRÓNIMOS

INSTITUCIONES

ADEQ	Departamento de Calidad Ambiental de Arizona
ADWR	Departamento de Recursos de Agua de Arizona
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical,
CILA	Comisión Internacional de Límites y Aguas entre México y los Estados Unidos
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua, México
DOE	Departamento de Energía
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
GAS	Gerencia de Aguas Subterráneas de CONAGUA
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
NRCS	Servicio de Conservación de Recursos Naturales
OOMAPAS	Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Nogales
SGM	Servicio Geológico Mexicano
UA	Universidad de Arizona
UNISON	Universidad de Sonora
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos
USFS	Servicio Forestal de los Estados Unidos
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos
WMO	Organización Meteorológica Mundial
WRRC	Centro de Investigación de Recursos Hídricos

TÉRMINOS TÉCNICOS CLAVE

AMA	Área de Gestión Activa
COTAS	Comité Técnico de Aguas Subterráneas, CONAGUA
DMA	Disponibilidad de Agua Subterránea
DNC	Descarga Natural Comprometida
DOF	Diario Oficial de la Federación, México
Eh	Potencial Redox
ENSO	El Niño Oscilación del Sur
ET	Evapotranspiración
FAOCLIM	Datos Climáticos Mundiales de la FAO
GHCN	Red Global Histórica de Climatología
GWSI	Inventario de Sitios de Agua Subterránea
IOI	Interceptor Internacional de Descargas “IOI”
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
K	Conductividad Hidráulica
LAN	Ley de Aguas Nacionales
LMP	Límites Máximos Permisibles
LMWL	Línea de Agua Meteórica Local Modificada
LULC	Uso y Cobertura de Suelo
MCGL	Objetivo de Nivel Máximo de Contaminantes
MCL	Niveles Máximos de Contaminantes
MODIS	Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada
M-SEVI	Índice de Vulnerabilidad Socioambiental Modificado
NAS	Acuífero Nogales en Sonora según lo definido por la CONAGUA
NED	Datos Nacionales de Elevación, Servicio Geológico de los Estados Unidos
NOAA	Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica

NOM	Norma Oficial Mexicana
PDO	Oscilación Decadal del Pacífico
pH	Potencial de Hidrógeno
PITAR	Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Alisos
R	Recarga
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua, CONAGUA
SCAA	Acuífero Santa Cruz en Arizona (incluye todas las partes del área SO estudio en Arizona)
SCAMA	Área de Gestión Activa de Santa Cruz según lo definido por el ADWR
SCRAS	Acuífero Río Santa Cruz en Sonora según lo definido por la CONAGUA
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SRES	Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones
Ss	Almacenamiento Específico
SSURGO	Base de Datos Geográfica del Estudio de Suelos
STATSGO	Base de Datos Geográfica Estatal de Suelos
Sy	Rendimiento Específico
TAAP	Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos
TDS	Sólidos Disueltos Totales
TEM	Sondeo Electromagnético
TSCAS	Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz según lo definido en la sección 1.2 de este reporte (toda el área de estudio)
UTM	Proyección Universal Transversa de Mercator.
VEAS	Volúmenes de Extracción de Agua Subterránea
WBM	Modelos de Balance Hídrico
WGS	Sistema Geodésico Mundial

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Estados Unidos y México comparten agua subterránea en varios acuíferos que cruzan la frontera internacional. No existe ningún tratado sobre el manejo de las aguas subterráneas en estos acuíferos compartidos, y la mayor parte del trabajo científico al respecto se ha realizado durante muchos años dentro cada país, sin pleno conocimiento de las condiciones y actividades del otro lado de la frontera. Tanto Estados Unidos como México reconocen que una mayor comprensión científica de estos sistemas acuíferos sería beneficiosa para ambos países.

Con la finalidad de comprender las condiciones de los acuíferos a lo largo de la frontera, los Ingenieros Principales de la sección mexicana y estadounidense de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) firmaron el "Informe Común de los Ingenieros Principales Referente al Proceso de Cooperación Conjunta México-Estados Unidos para el Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos" el 19 de agosto de 2009. La CILA coordinó el diálogo científico y el intercambio de información para hacer posible la preparación de este Informe Binacional de México-Estados Unidos. Este "Informe Común" sirve como marco de referencia para la coordinación entre EE. UU. y México con respecto a estudios de acuíferos transfronterizos. El documento aclara los detalles sobre la estructura y función del programa, incluidos los antecedentes, las funciones, las responsabilidades, el financiamiento, la relevancia de los tratados internacionales de agua y el uso de la información recopilada como parte del programa A pesar de las asimetrías en las instituciones binacionales y las diferencias culturales, de lenguaje y marcos regulatorios, esta relación binacional ha crecido y se ha fortalecido desde el 2009 con éxito en el desarrollo de bases de datos conjuntas e investigaciones binacionales, así como protocolos binacionales para la cooperación, clasificación y evaluación de acuíferos (Megdal y Scott, 2011; Callegary et al., 2018, Sánchez y Eckstein, 2020, Tapia-Villaseñor y Megdal, 2021).

A lo largo de la frontera entre Arizona y Sonora, las Secciones Estadounidense y Mexicana de la CILA acordaron iniciar con el estudio de dos acuíferos: el Acuífero Transfronterizo Río Santa Cruz y el Acuífero Transfronterizo Río San Pedro (Figura 1.1). El 15 de octubre de 2010, la Sección Mexicana de la CILA firmó dos contratos con la Universidad de Sonora (UNISON) que detallan la cooperación con respecto a la evaluación de los dos acuíferos. El Departamento de Geología fue la entidad designada por UNISON para realizar este trabajo técnico. La contraparte académica de UNISON en Estados Unidos para este programa es el Water Resources Research Center (WRRC) de la Universidad de Arizona (UA). El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA) son los co-investigadores federales principales para este estudio binacional que se lleva a cabo bajo el marco de la CILA.

Este informe se centra en el Sistema Acuífero Transfronterizo Río Santa Cruz (TSCAS). El Río

Santa Cruz se origina en el Valle de San Rafael en Arizona, fluye hacia el sur hacia Sonora y cruza el límite internacional en Lochiel, Arizona, pasando por Santa Cruz, Sonora unos 12.8 kilómetros (km) hacia el sur (Figura 1.2). A unos 20 km al sur del límite internacional, cerca de la comunidad de Miguel Hidalgo (San Lázaro), el río cambia de dirección hacia el oeste, luego al noroeste y cruza el límite internacional por segunda vez a unos 7 km al este de las zonas urbanas más grandes del TSCAS, las ciudades hermanas de Nogales, Arizona y Nogales, Sonora. Juntas son comúnmente conocidas como “Ambos Nogales”.

El agua del TSCAS es necesaria para la industria, la minería, la agricultura y los usos municipales, pero al mismo tiempo el TSCAS es importante ecológicamente, sustentando el Río Santa Cruz y los ecosistemas acuáticos y ribereños asociados (Norman, 2010). Se necesita una gestión del TSCAS basada en la mejor información científica disponible, tanto en México como en los Estados Unidos, para garantizar que el acuífero Santa Cruz beneficie a ambos países. Como resultado, se acordó integrar datos científicos de los Estados Unidos y México a través de este estudio binacional conjunto del Sistema Acuífero Transfronterizo Río Santa Cruz.

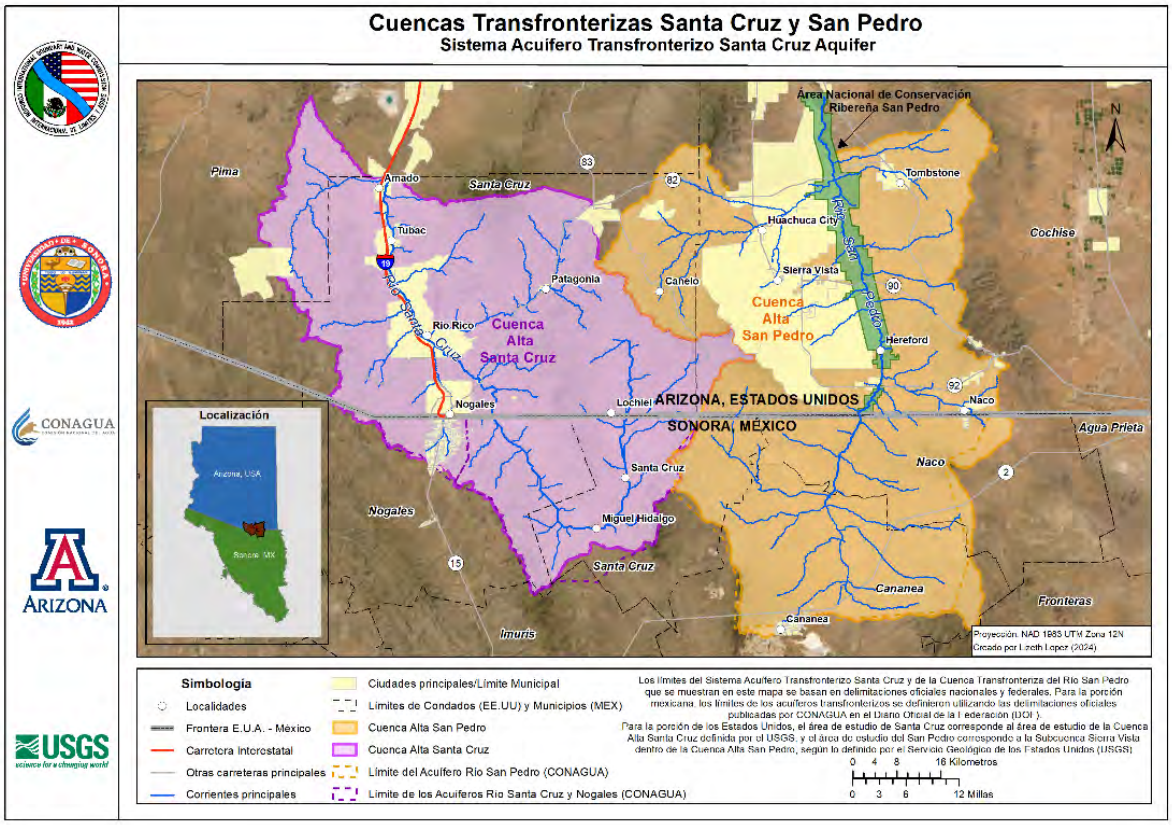


Figura 1.1 Cuencas Transfronterizas de Santa Cruz y San Pedro. (las líneas punteadas indican las subdivisiones de condados en EE. UU. y límites municipales en México).

Las ciudades de Ambos Nogales están ubicadas dentro de la cuenca del Arroyo Nogales (Nogales Wash). El Arroyo Nogales es el afluente transfronterizo más grande del Río Santa Cruz. Se origina en Sonora a unos 10 km al sur de la frontera internacional y fluye hacia el norte. La confluencia del Arroyo Nogales con el Río Santa Cruz está a unos 14 km al norte del límite internacional cerca de la comunidad de Río Rico, Arizona (Figura 1.2).

La ciudad de Nogales, Arizona depende de pozos ubicados a lo largo del Río Transfronterizo Santa Cruz para el suministro de agua. Los residentes de Nogales, Sonora, dependen de pozos ubicados en las regiones de las Paredes, Mascareñas, Los Alisos, y Cíbuta, junto con pozos urbanos de la ciudad (acuífero Nogales) (GAS-CONAGUA, 2024b). La mayor parte de las aguas residuales de las dos ciudades se transporta por una tubería (conocida como Colector Principal Internacional/International Outfall Interceptor o "IOI") a la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales (PITAR), ubicada cerca de Río Rico, Arizona. El agua tratada luego se descarga en el Río Santa Cruz, que de otro modo sería efímero, y fluye río abajo. La PITAR fue construida para manejar 645 litros por segundo (L/s): 211 L/s de Nogales, Arizona y 434 L/s de Nogales, Sonora. Sin embargo, se envió un promedio de 543 L/s desde Nogales, Sonora durante el período 2000-2011 (Tapia-Villaseñor et al., 2020). Para tratar el exceso, en 2012 se completó la construcción de una nueva planta, la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Alisos (PTAR), al sur de Nogales, Sonora, con el apoyo de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (EPA) y con el potencial de aumentar su capacidad (Norman et al., 2013). El tramo del Río Santa Cruz desde el punto de descarga de la PITAR cerca de Rio Rico hasta Tubac es en gran parte perenne, con un tramo temporalmente intermitente en el extremo norte que deja de fluir en el verano antes del inicio de la temporada de lluvias (estación USGS 09481740, Río Santa Cruz en Tubac, AZ). Al norte de Tubac, AZ, el río es efímero en la estación USGS 09482000, Río Santa Cruz en Continental, AZ, excepto en los tramos en Tucson aguas abajo de las dos plantas de tratamiento de aguas residuales de la ciudad.

1.2. Área de Estudio

La Cuenca Transfronteriza del Río Santa Cruz está ubicada en la parte central del límite internacional que separa el estado mexicano de Sonora y el estado estadounidense de Arizona (Figura 1.2). Se encuentra principalmente dentro de las ecorregiones del archipiélago Madreando y el desierto de Sonora de América del Norte (Wiken et al., 2011). Al este se encuentra la cuenca del Río San Pedro. Al sureste, sur y suroeste se encuentran las cuencas Río Concepción-Arroyo Cocóspera (acuíferos Cuitaca y Cocóspera) y Río Asunción (acuífero Los Alisos), y al oeste la Cuenca del Río Concepción (acuífero Río Altar). Las cuencas son unidades naturales del terreno, definidas por la existencia de una división de las aguas debido a la topografía (las partes más altas de las montañas), donde todo el escurrimiento converge y fluye hacia un punto común (SEMARNAT, 2013). Un acuífero es una formación geológica que almacena y transmite agua subterránea. Se constituye de materiales permeables como arena, grava, o rocas que permiten

el flujo del agua a través de ellas (Freeze y Cherry, 1979). La Cuenca Transfronteriza Río Santa Cruz contiene un “sistema acuífero” que se define como un grupo de “acuíferos de material poroso con diversas permeabilidades que pueden actuar como una unidad productora de agua a escala regional” (WMO, 2012). Los artículos borrador de la Ley de Acuíferos Transfronterizos de 2008 (United Nations International Law Commission, 2008) definen un “acuífero transfronterizo” o “sistema acuífero transfronterizo” como “un acuífero o sistema acuífero, en el cuál las partes del mismo están situadas en diferentes Estados”. Aunque los acuíferos de relleno aluvial regionales son los principales acuíferos en el área de estudio, los términos definidos anteriormente se refieren a áreas comprendidas dentro de la divisoria topográfica de la cuenca que incluye cadenas montañosas y cualquier acuífero rocoso dentro de las mismas.

En el sistema nacional de México, los acuíferos se delimitan típicamente con base en una combinación de acuíferos aluviales principales y montañas dentro de una divisoria topográfica. Este enfoque se alinea con conceptos como las “cuencas aluviales” descritas por Freethey y Anderson (1986) y las “áreas hidrogeológicas” de Anning y Knoieczki. Para los propósitos de este informe, los límites de los acuíferos dentro del territorio mexicano se definen mediante polígonos que reflejan las designaciones oficiales establecidas por las normas de la CONAGUA (Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 2025). Legalmente, la Ley de Aguas Nacionales (LAN, 1992, última reforma 2025) define un "acuífero" como "Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento, y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente a efectos de evaluación, gestión y administración de los recursos hídricos subterráneos nacionales..." Con base en estas definiciones, y dado que los acuíferos aluviales y rocosos dentro de la cuenca Río Santa Cruz se extienden continuamente a través de la frontera entre Estados Unidos y México, el TSCAS claramente cumple con los criterios de un sistema acuífero transfronterizo.

El TSCAS tiene una superficie de unos 3,890 km^2 y se subdivide en cinco áreas diferenciadas (Figura 1.3). Varias de estas áreas están definidas por ley, incluida el Área de Manejo Activa de Santa Cruz (SCAMA, por sus siglas en inglés) en los EE. UU. y los Acuíferos Río Santa Cruz y Nogales en México (Departamento de Recursos Hídricos de Arizona [ADWR], 2019a; GAS-CONAGUA, 2024a y 2024b). Debido a una cadena montañosa intermedia en la porción mexicana del TSCAS, el acuífero Nogales se considera una región administrativa distinta separada del acuífero Río Santa Cruz. Las dos áreas restantes, ambas en los EE. UU., son el Valle de San Rafael y la Cuenca Alta del Arroyo Sonoita. En las Figura 1.2 y Figura 1.3 se muestran en color sólido los límites administrativos de los acuíferos en territorio mexicano. Un límite de acuífero de mayor resolución representado por la línea punteada en la figura, útil para análisis detallados de aguas subterráneas y superficiales, fue definido en un esfuerzo binacional

anterior, la Iniciativa de Salud Ambiental Fronteriza (Norman et al., 2010a). Las diferencias en la delimitación a través del tiempo también ocurren en el lado estadounidense. El área no sombreada en la Figura 1.3 que contiene la ciudad de Patagonia ha sido clasificada de diversas formas como parte del área Empire Ranch (Freethey y Anderson, 1986), la cuenca superior del Río Santa Cruz (Anning y Konieczky, 2005), la cuenca del arroyo Sonoita (Gu et al., 2008) y la cuenca de Cienega Creek (ADWR, 2019b). El arroyo Sonoita es uno de los principales afluentes del Río Santa Cruz. Al suroeste, el Valle adyacente de San Rafael alberga las cabeceras del Río Santa Cruz. Al sur, en México, el acuífero Río Santa Cruz tiene una superficie de unos 952 km^2 (GAS-CONAGUA, 2024a) y se identifica con el código 2615. Al oeste, el acuífero Nogales se identifica con el código 2650 y tiene una superficie de unos 121 km^2 (GAS-CONAGUA, 2024b). En Arizona, el SCAMA, con una superficie de unos 1,791 km^2 (ADWR, 2020), ocupa la parte noroeste del TSCAS que incluye la desembocadura de la cuenca.

Este informe hace uso de los siguientes términos:

1. El Acuífero Río Santa Cruz en Sonora (SCRAS, por sus siglas en inglés) definido por CONAGUA.
2. El Acuífero Nogales en Sonora (NAS, por sus siglas en inglés) según lo definido por CONAGUA.
3. El acuífero Santa Cruz en Arizona (SCAA, por sus siglas en inglés) incluye todas las partes del área de estudio en Arizona.
4. El Área de Manejo Activa de Santa Cruz (SCAMA, por sus siglas en inglés) como lo define el Departamento de Recursos Hídricos de Arizona (ADWR).
5. El Sistema Acuífero Transfronterizo Río Santa Cruz (TSCAS, por sus siglas en inglés) tal como se define en la sección 1.2 de este informe (toda el área de estudio).
6. El acuífero Highlands-Sky Islands del sur de las Montañas Santa Rita y las Montañas Patagonia en Arizona, Estados Unidos y las Sierra San Antonio en Sonora, México (HSIA, por sus siglas en inglés).

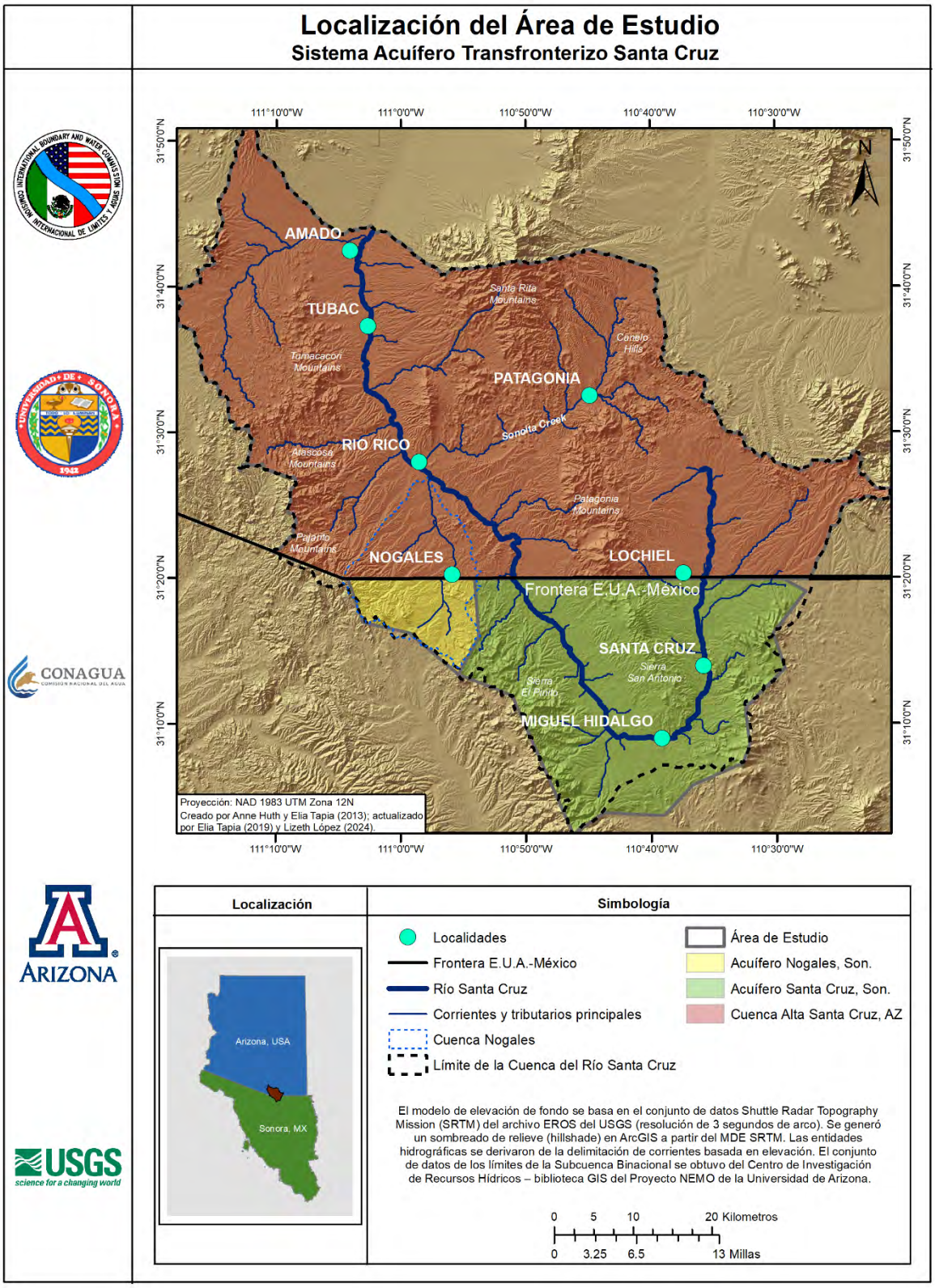


Figura 1.2 Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

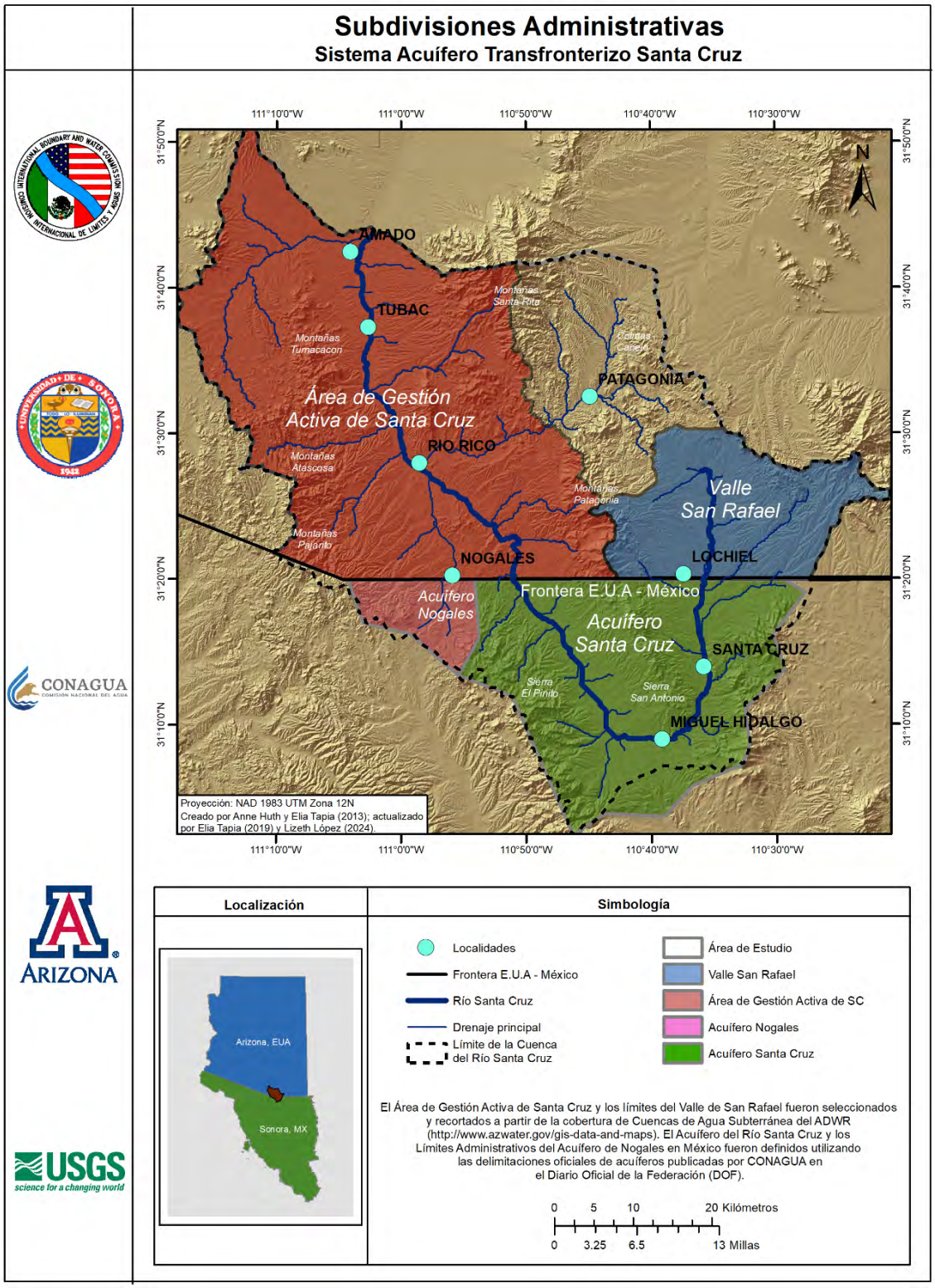


Figura 1.3 Subdivisiones Administrativas del Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

1.3. Objetivos del Estudio

El objetivo general de este estudio es comprender las características hidrogeológicas del Sistema Acuífero Transfronterizo Río Santa Cruz y establecer una base y un proceso uniforme para trabajos futuros en términos de recopilación y compilación de datos, revisión de la literatura existente y nuevos análisis. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Comprender el entorno geológico e hidrogeológico del Sistema Acuífero Transfronterizo Río Santa Cruz.
- Recopilar información científica de ambos países para apoyar el desarrollo de un modelo numérico hidrodinámico del sistema acuífero binacional que incluya las interacciones de las aguas superficiales y subterráneas.
- Siempre que sea posible, integrar conjuntos de datos de cada país y describir las características del sistema acuífero en su contexto transfronterizo.

1.4. Estudios Previos y Monitoreo en proceso

Una evaluación binacional depende de la integración de muchos estudios y publicaciones de ambos lados de la frontera. Aunque los estudios se describirán con mayor detalle en el cuerpo del informe, aquí enumeramos algunos estudios previos, incluidos aquellos que avanzaron en la comprensión hidrológica del TSCAS a través de esfuerzos de medición, análisis o modelado de múltiples fuentes y tipos de datos. Numerosos estudios estadounidenses y mexicanos fueron catalogados por la Universidad de Arizona (Vandervoet, 2009). Se han llevado a cabo una serie de estudios hidrológicos en el área identificada para esta evaluación binacional y, aunque se detalla gran parte del trabajo anterior, ninguno ha cubierto el área binacional de manera integral y la gama particular de temas considerados aquí.

En el lado mexicano del TSCAS, los estudios publicados cubren estratigrafía, economía, geología estructural, hidrogeología y geología ambiental. Entre los más destacados se encuentra el artículo “Santa Cruz, un Nuevo Campamento de Cobre en Sonora, México” (Merrill, 1907), que documenta la prospección y explotación minera en el meandro suroeste del Río Santa Cruz a principios del siglo XX. Más recientemente, la Universidad de Sonora (Rangel et al., 2005) publicó el “*Atlas de aguas subterráneas y monitoreo piezométrico para el estado de Sonora”*, que documentó redes de monitoreo de agua subterránea en Sonora para la Comisión Nacional del Agua de México. Otros estudios realizados en México incluyen la “Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2650) Nogales, estado de Sonora” (GAS-CONAGUA, 2024b) y *“Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2650) Río Santa Cruz, estado de Sonora”* (GAS-CONAGUA, 2024a). Estos informes son parte de una serie que brinda información básica sobre los acuíferos en todo México, incluidas las estimaciones de los componentes del balance hídrico. Se publican en el Diario Oficial de la Federación de México de conformidad con la NOM-011-CONAGUA-2015 y se actualizan aproximadamente cada cinco años (DOF, 2015). Finalmente, el estudio *“Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Río Santa Cruz, en el Estado de Sonora, Primera Etapa”* fue elaborado en 2011 por UNISON (Minjarez et al., 2011) para la

Sección Mexicana de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). Incluyó evaluaciones climatológicas, geológicas, geomorfológicas, geofísicas y geoquímicas, además de un levantamiento de pozos, pruebas de bombeo y datos piezométricos e hidrométricos; los resultados sirvieron de base para este informe.

Del lado estadounidense, ADWR ha sido la principal entidad involucrada en el estudio de la hidrología de aguas subterráneas del SCAMA. Mantiene una red de monitoreo de aguas subterráneas (https://gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/) y ha publicado varios informes, incluidos tres basados en modelos regionales que simulan flujos de aguas subterráneas en el SCAMA (Nelson, 2007; Erwin, 2007; Hart, 2019; ADWR, 2020). El primer modelo cubre el área del acuífero Santa Cruz desde la frontera internacional norte hasta la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales ubicada cerca de Río Rico, Arizona (Erwin, 2007). Este modelo está diseñado para estudiar la región conocida localmente como el área de las "microcuencas", que experimenta fluctuaciones estacionales del nivel freático del orden de decenas de metros. El segundo modelo (Nelson, 2007) cubre el área del SCAMA desde la PITAR hasta el límite norte del área de estudio. El tercer modelo, corresponde a una versión actualizada del modelo de Nelson (2007) y representa el cauce principal del Río Santa Cruz desde Río Rico hasta Amado, Arizona (Hart, 2019), mientras que el cuarto modelo integra los modelos anteriores (ADWR, 2020).

El Departamento de Calidad Ambiental de Arizona (ADEQ, por sus siglas en inglés) lleva a cabo un monitoreo continuo de la calidad del agua tanto superficial como subterránea en el área de estudio. Los datos sobre la calidad del agua están disponibles para los sistemas públicos de agua, así como para los sitios de aguas superficiales y subterráneas (https://waterdata.azdeq.gov/AZWQDB/Pages/Login/?ReturnUrl=%2fAZWQDB%2f; https://www.waterqualitydata.us/portal/). ADEQ publica informes que describen la calidad del agua superficial en relación con los estándares estatales y los usos designados, incluida una lista de aguas superficiales deterioradas que requieren el desarrollo de una Carga Diaria Máxima Total. Los estudios adicionales que se han llevado a cabo, para los cuales los datos o el análisis son de beneficio directo para este proyecto, incluyen estudios de contaminantes de preocupación emergente (Alvarez et al., 2015; Coes et al., 2014), geología y geofísica (Bultman, 2015; Page et al., 2016a, 2016b), hidrología de aguas superficiales y transporte de sedimentos (Niraula et al., 2015, Norman et al., 2012b; Niraula y Norman, 2015; Shamir et al., 2007) impactos climáticos (Norman et al., 2010b; Shamir et al., 2015; Tapia-Villaseñor et al., 2020; Shamir et al., 2021; Tapia-Villaseñor et al., 2022) y compromiso de actores (Eden et al., 2016). Más recientemente, Paretti et al., (2018) publicaron un análisis de un estudio de tres años sobre las fuentes, el momento y la distribución de *Escherichia coli* en la parte alta del Río Santa Cruz dentro y aguas arriba del Parque Nacional Histórico Tumacácori. Estos y otros estudios serán discutidos en detalle en los capítulos siguientes.

1.5. Entorno Socioeconómico Binacional

En Sonora, el área de estudio comprende los municipios de Santa Cruz y Nogales, cuyos centros administrativos se denominan Santa Cruz y Nogales, respectivamente. En Arizona, Nogales es la sede del condado de Santa Cruz, que cubre la mayor parte del área de estudio en Arizona (Figura 1.1 y Tabla 1.1). La mayoría de los residentes en el área de estudio viven en las ciudades de Nogales, Arizona y Nogales, Sonora. Sin embargo, la población de Nogales, Sonora es diez veces mayor que la de Nogales, Arizona (INEGI, 2020; Oficina de Oportunidad Económica de Arizona, 2020; Tabla 1.1). Juntas, las ciudades de Arizona y Sonora que comparten el nombre de Nogales forman la comunidad binacional más grande en la frontera entre Arizona y Sonora.

Tabla 1.1 Población en las Principales Entidades de la Cuenca Transfronteriza de Santa Cruz
(Datos de población del INEGI, Censo de 2020 y Oficina de Oportunidad Económica de Arizona, basada en el Censo de EE. UU., 2020)

Comunidad	Número estimado de residentes (2020)
Nogales, Sonora	264,782
Nogales, Arizona	19,750
Río Rico, Arizona	20,549
Tubac, Arizona	1,581
Patagonia, Arizona	804
Santa Cruz, Sonora	1,835
Miguel Hidalgo (San Lázaro), Sonora	599

Con respecto a la educación, el acceso a los recursos, el estatus migratorio, la vivienda y el número de dependientes, Norman et al., (2012a) utilizaron determinantes de censos binacionales y datos de colonias (vecindarios) para desarrollar un Índice de Vulnerabilidad Socioambiental Modificado (M-SEVI) de la Cuenca del Río Santa Cruz. En el TSCAS se identificaron una serie de colonias de alta vulnerabilidad socioambiental. Algunas de estas son *colonias reconocidas* como vecindarios fronterizos que típicamente incluyen viviendas y/o infraestructura inadecuada (Norman et al., 2006, 2004). Por otro lado, varias comunidades presentaron vulnerabilidad socioambiental muy baja, entre ellas Nogales, Arizona y Nogales, Sonora. Norman et al. 2012 también identificaron áreas de menor vulnerabilidad socioambiental en la periferia de la zona urbana, en zonas más rurales.

Ambos Nogales sirve como puente para el comercio internacional entre los Estados Unidos y México, con las importaciones de México a través de este puerto de entrada superando ampliamente el valor de cualquier otro puerto de entrada en Arizona (Eller College of Management, 2024). El Corredor CANAMEX, ubicado en la Cuenca de Santa Cruz (I-19 en Arizona/I-15 en Sonora), según lo define el Congreso en la Ley de Designación de Sistemas de Carreteras Nacionales (Ley Pública 104-95), es un Corredor de Alta Prioridad (Congreso de los Estados Unidos, 1995). La industria maquiladora (manufactura realizada principalmente en México, por lo general por empresas estadounidenses que elaboran productos para exportarlos a los Estados Unidos) es una parte importante de la economía de Ambos Nogales. Según la Fundación de Desarrollo Económico del Condado de Santa Cruz (2019), hay más de 100 maquiladoras en Nogales, Sonora que emplean directamente a más del 15% de la población (alrededor de 34,000 personas). Los viajes y el turismo también son un motor económico en el condado de Santa Cruz. Un informe de la Oficina de Turismo de Arizona estimó $220,000,000 en gastos de visitantes en el condado de Santa Cruz en 2018 (Dean Runyan Associates, 2019).

La agricultura existe en el área de estudio en ambos lados de la frontera, pero es de escala relativamente pequeña, especialmente cuando se compara con la agricultura en otras partes de los dos estados. No hay distritos de riego en Sonora o Arizona. En la parte superior de la cuenca, la mayor parte del área del Valle de San Rafael (Figura 1.3) se manejó históricamente como un gran rancho y actualmente es una de las pocas parcelas de tierra estatal que no han sido alteradas significativamente por el contacto humano (Arizona State Parks, 2019). De las aproximadamente 36,000 hectáreas del valle, el Servicio Forestal de los EE. UU. administra alrededor del 73% (ADWR, 2009). La mayoría de las tierras restantes pertenecen al gobierno del estado (categorizadas como “Área Natural”) o son de propiedad privada, pero están sujetas a restricciones legales para su conservación. Estos instrumentos legales de conservación o derechos de conservación (conservation easements), preservan los ranchos de trabajo como espacio abierto a perpetuidad donde no se permite el desarrollo ni el cambio en el uso de suelo. En Sonora existen alrededor de 3,000 hectáreas irrigadas para la producción agrícola en el SCRAS

(Minjarez et al., 2011). Dentro de la SCAMA existen alrededor de 2,100 hectáreas que cuentan con derechos de riego otorgados por el estado de Arizona (ADWR, 1999). Si bien hay poca producción agrícola en el área cercana a Ambos Nogales, es un importante puerto de entrada internacional para productos agrícolas, y es el puerto más grande para frutas y verduras en Arizona y las regiones vecinas de los Estados Unidos (del Castillo et al., 2007). Tomates, pepinos, pimientos, calabacines, melones, sandías, mangos y uvas representan más del 75% de los productos frescos que pasan por el puerto. Los productos son originarios de Sonora y Sinaloa, así como de otros estados mexicanos. Casi 200,000 camiones transportan anualmente estas frutas y verduras al norte de Nogales, Arizona y hacia las regiones vecinas de los Estados Unidos. Los impactos directos e indirectos de este negocio de importación/exportación agrícola a Nogales, Arizona, resultan en más de 4,000 empleos y $400 millones de dólares anuales (Fundación de Desarrollo Económico del Condado de Santa Cruz, 2017). Este sector es la mayor fuente de empleo en el condado de Santa Cruz, Arizona.

Después de la importación de productos agrícolas, la minería ha sido y continúa siendo la siguiente industria más importante en el área de estudio. La minería comenzó con las tribus indígenas antes de la llegada de los europeos (Schrader y Hill, 1915). Hay yacimientos en los distritos mineros de las Montañas Patagonia en Arizona que se han extraído en una escala relativamente pequeña a moderada durante más de cien años. También existen yacimientos de cobre y otros metales que actualmente no se han desarrollado por razones que incluyen profundidad y grado de mineralización (Lecumberri-Sánchez et al., 2013; Vikre et al., 2014). Existen varias aplicaciones y planes de exploración y minería tanto en Arizona como en Sonora (Wilson et al., 2016; Broch, 2012). Uno de los depósitos más grandes conocidos en Sonora (a partir de 2025) es “El Pilar”, un depósito de cobre perteneciente a Southern Copper Company, una subsidiaria de Grupo México. Ubicada cerca del pueblo de Miguel Hidalgo (San Lázaro) a lo largo de la parte sur del Río Santa Cruz, la producción potencial máxima estimada de El Pilar es de 940 millones de libras de cobre durante 16 años (Bennet et al., 2022). Otra propiedad minera importante en el condado de Santa Cruz, Arizona, consiste en dos depósitos, los depósitos Hermosa (manganeso-plata-zinc) y Taylor (plomo-zinc-plata) (Wilson et al., 2016), que pertenecen a la empresa minera australiana South32. Los yacimientos, ubicados al sur de la ciudad de Patagonia en las Montañas Patagonia, se desarrollarán como minas subterráneas.

1.6. Diferencias Institucionales en la Gestión del Agua en los Estados Unidos y México

Una comparación de la gestión del agua en México y los EE. UU. y las implicaciones para el Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos (TAAP) fue presentada en un estudio de la Universidad de Arizona (Megdal y Scott, 2011). En dicho estudio, los autores encontraron que los esfuerzos para reconciliar las diferencias en los marcos legales e institucionales eran esenciales para el desarrollo del TAAP.

En México, parte de la gestión federal del agua está a cargo de trece Organismos de Cuenca que son

los encargados de preservar las aguas del país y administrar las políticas y programas de CONAGUA (CONAGUA, 2021). Los acuíferos Río Santa Cruz y Nogales están bajo la jurisdicción del Organismo de Cuenca del Noroeste de la CONAGUA. Sus territorios están sujetos a lo dispuesto en las disposiciones del "decreto que establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región denominada Cuenca del Río Santa Cruz, municipios de Nogales y Santa Cruz, estado de Sonora", publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 25 de enero de 1961 (DOF, 2015). Una pequeña porción de las zonas serranas que delimitan el acuífero al este y oeste del acuífero Río Santa Cruz en Sonora, se rige por el "decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona", publicado en el DOF el 19 de septiembre de 1978 (DOF, 1978). Ambos decretos se clasifican como tipo III, en los que la capacidad del acuífero permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, riego y otros (DOF, 1978). De acuerdo con la Ley Federal de Derechos e Impuestos de 2022, las cuencas del Río Santa Cruz y del arroyo Los Nogales se ubican en la zona de disponibilidad hídrica 7 (DOF, 2025), pero el acuífero Río Santa Cruz (2615) se considera zona de disponibilidad hídrica 2, y el acuífero de Nogales (2650) se considera zona de disponibilidad hídrica 1 (GAS-CONAGUA 2024a, 2024b). Los principales usuarios del agua son los sectores público urbano y agropecuario. Ni el acuífero Río Santa Cruz ni el acuífero Nogales en Sonora están ubicados en alguna unidad o distrito de riego, ni se ha establecido un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS).

De acuerdo con la ley de los Estados Unidos, los estados son la autoridad principal para la gestión de las aguas subterráneas. En Arizona, ADWR regula el uso de agua subterránea de acuerdo con el Código de Agua Subterránea de Arizona de 1980. Hay ocho áreas en Arizona designadas como Áreas de Manejo Activa (AMA), donde, debido a una sobreexplotación grave, el uso de aguas subterráneas está sujeto al más alto nivel de administración con algunas reglas específicas para cada una (ADWR, 2019a y 2019b, s.f.). El Área de Gestión Activa de Santa Cruz es una de esas AMA. Los siguientes son ejemplos de algunas de las regulaciones que la agencia estatal de agua ADWR aplica en esta región, con el objetivo de mantener una condición de rendimiento seguro en el área de manejo activa y evitar que los niveles freáticos locales experimenten disminuciones a largo plazo.

1. Se prohíbe la expansión de la agricultura basada en aguas subterráneas;
2. Se permite la conversión de derechos agrícolas a usos no agrícolas, pero no a la inversa;
3. Los servicios de agua potable deben cumplir con los estándares estatales de conservación de agua;
4. El sector industrial, que incluye plantas termoeléctricas, minas de cobre, minas de arena y grava, entre otros, debe cumplir con estándares específicos de conservación de agua;

5. Existen incentivos regulatorios para promover la reutilización de aguas residuales;
6. Se prohíbe el desarrollo sin antes demostrar la existencia de un suministro de agua garantizado por cien años [el agua debe estar garantizada física, legal y financieramente];
7. La medición y el informe de la extracción de agua subterránea son obligatorios para los pozos equipados con bombas que tengan una capacidad de 2.2 litros por segundo o más, y el volumen extraído está sujeto a un impuesto anual.

Fuera de las AMA, el acceso y el bombeo de aguas subterráneas están sujetos a una regulación mínima por parte del estado de Arizona. Esto incluye partes del área de estudio como el Valle de San Rafael y la subcuenca superior del Arroyo Sonoita. Una de las regulaciones del estado de Arizona que es más relevante en las áreas ubicadas fuera de las AMA es el requisito de realizar un estudio de disponibilidad de agua de 100 años antes de que se apruebe cualquier desarrollo. Si después de realizar este estudio hidrológico, económico y legal, no se puede demostrar que hay suministro de agua suficiente para un período de 100 años, la entidad que vende el inmueble tiene la obligación de revelar este hallazgo al comprador antes de cerrar el contrato.

1.7. Trabajo Técnico Realizado

Este informe es producto de las actividades técnicas realizadas en Sonora y Arizona en un ambiente de cooperación entre instituciones académicas y agencias federales de Estados Unidos y México. Con la coordinación de CILA, el trabajo técnico fue realizado por el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora (UNISON), la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA), el Centro de Investigación de Recursos Hídricos de la Universidad de Arizona (WRRC) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). La Universidad de Sonora fue contratada por CILA para realizar un estudio técnico sobre el acuífero Río Santa Cruz en Sonora. El informe mexicano que preparó UNISON (Minjarez et al., 2011) sentó las bases para el análisis hidrológico en el lado sonorense de la frontera, llenando vacíos sustanciales que hicieron posible el análisis binacional. Las actividades de campo se realizaron durante los meses de febrero a marzo y de mayo a agosto de 2011. En la primera fase se realizó un levantamiento de pozos de agua subterránea, recopilando información sobre el número y ubicación de pozos existentes, tipo y el uso del pozo, estado operativo, las características del equipamiento, tipo de descarga y los mecanismos de operación y medición. También se midieron los niveles estáticos de agua subterránea y parámetros físicos y químicos como conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, temperatura, pH, potencial redox (Eh) y salinidad. Además, se realizaron diez pruebas de acuíferos de corta duración (pruebas de bombeo) que sirvieron para estimar los parámetros hidráulicos del área de estudio. También se obtuvieron muestras de agua para el análisis de los principales cationes y aniones (consulte el Capítulo 7 Hidrogeoquímica). Los estudios geofísicos llevados a cabo en Sonora se describen en el Capítulo 4. Dentro de Arizona, el

USGS y la Universidad de Arizona llevaron a cabo un estudio geofísico en el área de las “microcuencas” para mejorar la comprensión del espesor y la permeabilidad del acuífero aluvial (Culbertson et al., 2010).

1.8. Metodologías y Técnicas Aplicadas

Inicialmente, se recopilaron datos existentes de estudios hidrogeológicos, geológicos y geofísicos, y se analizaron una serie de mapas, planos y artículos sobre la porción mexicana del área de estudio. En lugar de citar la literatura que se revisó y analizó en este capítulo, se presentarán las referencias según sea necesario a lo largo del informe. Para la elaboración del mapa base y los mapas relacionados en el presente estudio, se utilizaron mapas topográficos a escala 1:50.000 y modelos digitales de elevación editados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y mapas geológicos mineros escala 1:250.000 del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y el USGS.

Adicionalmente, se utilizó la información recopilada durante los esfuerzos de caracterización hidrogeológica realizados por la Universidad de Sonora (Minjarez et al., 2011). La información recolectada fue modificada en base a visitas de campo y utilizada para generar los mapas incluidos en este informe. Todos los datos presentados en este informe han sido publicados previamente

Bibliografía

Alvarez, D., Callegary, J.B., Paretti, N. V., Coes, A.L., 2015. Demonstration project using a modified POCIS for monitoring emerging contaminants in a groundwater well, in: SETAC North America 36th Annual Meeting. Salt Lake City, Utah.

Anning, D.W., and Konieczki, A.D. 2005. "Classification of Hydrogeologic Areas and Hydrogeologic Flow Systems in the Basin and Range Physiographic Province, Southwestern United States." Report 1702. Professional Paper. USGS Publications Warehouse. https://doi.org/10.3133/pp1702.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 1999. Third Management Plan for Santa Cruz Active Management Area (2000-2010). Consultado el 26 de junio de 2019 en: http://infoshare.azwater.gov/docushare/dsweb/Get/Document-10010/SantaCruz_3MP.pdf

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2009. Arizona Water Atlas, Volume 2: Eastern Plateau Planning Area: 188p.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2019a. Active Management Areas. Consultado el 26 de Junio de 2019 en: https://new.azwater.gov/ama

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2019b. Arizona Water Atlas: Consultado el 28 de Junio de 2019 en: https://infoshare.azwater.gov/docushare/dsweb/View/Collection-19

Arizona Department of Water Resources (ADWR), s.f. "Active Management Area Overview", consultado el 23 de abril de 2026, https://www.azwater.gov/ama/active-management-area-overview

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2020. Fourth Management Plan: Santa Cruz Active Management Area (4MP). Phoenix, AZ

Arizona Office of Economic Opportunity 2020 Census, (2020). Consultado el 4 de Agosto de 2025 en: https://oeo.az.gov/population/census/2020.

Arizona State Parks, San Rafael State Natural Area: Science. Consultado el 1 de Julio de 2019 en: https://azstateparks.com/san-rafael/explore/science

Bennett, A., Tahija, L., Murrieta, A., Turner, R., Tolmer, D., & Pegnam, M. (2022, Febrero 28). *El Pilar Project: S-K 1300 technical report summary, feasibility study, Sonora, Mexico* (M3-PN210092, Revision 0). Southern Copper Corporation. https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1001838/000155837022002995/scco-20211231ex9692df9bd.pdf

Broch, M., 2012, Feasibility Study El Pilar Project Sonora, Mexico. Mercator Minerals Technical Report NI43-101F1

Bultman, M.W., 2015. Detailed Interpretation of Aeromagnetic Data from the Patagonia Mountains Area, Southeastern Arizona: Scientific Investigations Report 2015 – 5029, 25 p., http://dx.doi.org/10.3133/sir20155029.

Callegary, J.B., Megdal, S.B., Tapia Villaseñor, E.M., Petersen-Perlman, J.D., Minjárez Sosa, I., Monreal, R., Gray, F., and Grijalva Noriega, F. 2018. "Findings and Lessons Learned from the Assessment of the Mexico-United

States Transboundary San Pedro and Santa Cruz Aquifers: The Utility of Social Science in Applied Hydrologic Research." Journal of Hydrology: Regional Studies 20: 60–73. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.08.002.

Coes, A.L., Paretti, N. V., Foreman, W.T., Iverson, J.L., Alvarez, D.A., 2014. Sampling trace organic compounds in water: A comparison of a continuous active sampler to continuous passive and discrete sampling methods. Sci. Total Environ. 473–474, 731–741. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.082

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2021. Programa Hídrico Regional 2021-2024. Región Hidrológico-Administrativa II Noroeste. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales–Gobierno de México.

Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, 2025. Ley de Aguas Nacionales, Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1o de diciembre de 1992. Texto vigente, Última Reforma DOF 11-02-2025.

Culbertson, C., Lytle, W.E. McMilan, M.M., Sternberg, B.K., Withers, K.B., 2010. Transient Electromagnetic (TEM) Investigation of Microbasin Morphology along the Santa Cruz River, Nogales, Arizona. http://www.lasi.arizona.edu/GEN%20416-516%202010%20Final%20Report.pdf

Dean Runyon Associates, 2019, Arizona Travel Impacts 2000-2018p. Prepared for the Arizona Office of Tourism. Consultado el 10 de Junio de 2020 en:: https://tourism.az.gov/wp-content/uploads/2019/07/Arizona-Travel-Impacts-2000-2018.pdf

del Castillo, G., Peschard-Sverdrup, A., Fuentes, N.A., 2007. Estudio de puertos de entrada México-Estados Unidos: Análisis de capacidades y recomendaciones para incrementar su eficiencia. El Colegio de la Frontera Norte.

Diario Oficial de la Federación (DOF, 1978). Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona. https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4729825&fecha=19/09/1978&cod_diario=203851

Diario Oficial de la Federación (DOF, 2015). NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Accessed August 4, 2025: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0

Diario Oficial de la Federación (DOF, 2025). Acuerdo por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2025, en términos del último párrafo del artículo 231 de la Ley Federal de Derechos vigente. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5753352&fecha=31/03/2025#gsc.tab=0

Eden, S., Megdal, S., Shamir, E., Chief, K., Mott Lacroix, K., 2016. Opening the Black Box: Using a Hydrological Model to Link Stakeholder Engagement with Groundwater Management. Water 8, 216. https://doi.org/10.3390/w8050216

Eller College of Management Arizona-Mexico Economic Indicators, 2024, U.S. Imports from Mexico by Port of Entry. azmex.eller.arizona.edu/commodity-flows/us-imports-mexico-az-bpoe. Consultado el 17 de Junio de 2015

Erwin, G., 2007. Groundwater Flow Model of the Santa Cruz Active Management Area Microbasins International Boundary to Nogales International Wastewater Treatment Plant | Arizona Department of Water Resources (azwater.gov)

Freethey, G. W., and Anderson, T.W. 1986. "Predevelopment Hydrologic Conditions in the Alluvial Basins of Arizona and Adjacent Parts of California and New Mexico." Report 664. Hydrologic Atlas. USGS Publications Warehouse. https://doi.org/10.3133/ha664.

Freeze, R. A., y Cherry, J. A. 1979. Groundwater (2nd ed.). Prentice-Hall.

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024a, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2615) Río Santa Cruz, Estado de Sonora. 30p. Consultado el 4 de Agosto de 2025 en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2615.pdf

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024b, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2650) Nogales, Estado de Sonora. 25p. Consultado el 4 de Agosto de 2025 en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2650.pdf

Gu, A., Gray, F., Eastoe, C., Norman, L., Duarte, O.,-Long, A., 2008., Tracing Ground Water Input to Base Flow Using Sulfate (S, O) Isotopes. Agua Subterránea 46(3):502-509. doi: https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00437.x.

Hart. O. 2019. Updates to the Northern Santa Cruz AMA (NSCAMA) Groundwater Flow Model. Technical Memorandum. https://www.azwater.gov/sites/default/files/2022-12/NSCAMAmodelupdates_05082019.pdf

Hydrologic Scenarios for the Southern Santa Cruz River. Hydrologic Research Center, HRC

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2020. Censo de Población y Vivienda 2020. https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/#mapas.

Lecumberri-Sanchez, P., Newton, M.C., Westman, E.C., Kamilli, R.J., Canby, V.M., Bodnar, R.J., 2013. Temporal and spatial distribution of alteration, mineralization and fluid inclusions in the transitional high-sulfidation epithermal–porphyry copper system at Red Mountain, Arizona. J. Geochemical Exploration. 125, 80–93. https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2012.11.017

Megdal, S. B., y Scott, C. A., 2011. The Importance of Institutional Asymmetries to the Development of Binational Aquifer Assessment Programs: The Arizona-Sonora Experience. Water, 3, 949–963.

Merrill, F., 1907. Santa Cruz, a new copper camp in Sonora (Mexico). Eng. And Min. Jour., vol. 83, p. 1043.

Minjarez Sosa, I., Monreal Saavedra, R., Grijalva Noriega, F.J., Ochoa Granillo, J.A., Tapia Villaseñor, E.M.,

Nelson, K. M., 2007. Groundwater Flow Model of the Santa Cruz Active Management Area Along the Effluent-Dominated Santa Cruz River Santa Cruz and Pima Counties, Arizona (No. Modeling Report No. 14). Retrieved

from Arizona Department of Water Resources website: http://www.azwater.gov/AzDWR/Hydrology/Modeling/documents/Modeling_Report_14.pdf https://www.azwater.gov/hydrology/groundwater-modeling/santa-cruz-regional-model

Niraula, R., Meixner, T., Norman, L.M., 2015. Determining the importance of model calibration for forecasting absolute/relative changes in streamflow from LULC and climate changes. J. Hydrology. 522, 439–451. https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2015.01.007

Niraula, R., Norman, L.M., Meixner, T., Callegary, J.B., 2012. Multi-gauge calibration for modeling the semi-arid anta Cruz watershed in Arizona-Mexico border area using SWAT. Air, Soil Water Res. 5, 41–57. https://doi.org/10.4137/ASWR.S9410

Nogales-Santa Cruz County Economic Development Foundation, 2017. Economic Impact - Impact and Trending Directions. Accessed January 1, 2017: http://nogales.com/industry/economic-impact/.

Nogales-Santa Cruz County Economic Development Foundation, 2019. Maquiladoras. Accessed July 1, 2019, en: https://nogales.com/industry/manufacturing/maquiladoras/

Norman, L. M., Villarreal, M., Niraula, R., Meixner, T., Frisvold, G., y Labiosa, W., 2013. Framing Scenarios of Binational Water Policy with a Tool to Visualize, Quantify and Valuate Changes in Ecosystem Services. Water, 5(3), 852–874. https://doi.org/10.3390/w5030852

Norman, L., Tallent-Halsell, N., Labiosa, W., Weber, M., McCoy, A., Hirschboeck, K., Callegary, J., van Riper, C., Gray, F. 2010b. "Developing an Ecosystem Services Online Decision Support Tool to Assess the Impacts of Climate Change and Urban Growth in the Santa Cruz Watershed; Where We Live, Work, and Play." Sustainability.

Norman, L.M., Caldeira, F., Callegary, J., Gray, F., O' Rourke, M.K., Meranza, V., Van Rijn, S., 2012a. Socio-Environmental Health Analysis in Nogales, Sonora, Mexico. Water Qual. Expo. Health 4, 79–91. https://doi.org/10.1007/s12403-012-0067-x

Norman, L.M., Callegary, J.B., van Riper, C., III, and Gray, F., 2010a, The Border Environmental Health Initiative; investigating the transboundary Santa Cruz watershed: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2010-3097, 2 p.

Norman, L.M., Feller, M., Villarreal, M.L., 2012b. Developing spatially explicit footprints of plausible land-use scenarios in the Santa Cruz Watershed, Arizona and Sonora. Landscape and Urban Planning. 107, 225–235. https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2012.06.015

Norman, L.M., Niraula, R., 2015. Model analysis of check dam impacts on long-term sediment and water budgets in Southeast Arizona, USA. Ecohydrology. Hydrobiololgy. https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.12.001

Norman, L.M., Parcher, J.W., Lam, A.H., 2004. Monitoring Colonias Along the United States Mexico Border. Fact Sheet 2004–3070. , U.S. Geological Survey. https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3070/report.pdf

Norman, Laura M., Angela Donelson, Edwin Pfeifer, and Alven H. Lam. 2006. “Colonia Development and Land Use Change in Ambos Nogales, United States-Mexican Border.” Report 2006–1112. Version 1.0. Open-File Report. USGS Publications Warehouse. https://doi.org/10.3133/ofr20061112.

Page, W.R., Gray, F., Bultman, M.W., Menges, C.M., 2016a. Hydrogeologic investigations of the Miocene Nogales Formation in the Nogales Area, Upper Santa Cruz Basin, Arizona, Scientific Investigations Report. https://doi.org/10.3133/SIR20165087

Page, W.R., Menges, C.M., Gray, F., Berry, M.E., Bultman, M.W., Cosca, M.A., VanSistine, D.P., 2016b. Geologic map of the Rio Rico and Nogales 7.5’ quadrangles, Santa Cruz County, Arizona. Scientific Investigations Map. https://doi.org/10.3133/SIM3354

Paretti, N.V., Kephart, C.M., Porter, T.J., Hermosillo, E., Cederberg, J.R., Mayo, J.P., Gungle, B., Coes, A.L., Tucci, R.S., and Norman, L.M., 2019, Spatial and temporal distribution of bacterial indicators and microbial-source tracking within Tumacácori National Historical Park and the upper Santa Cruz River, southern Arizona and northern Mexico, 2015–2016: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2019–5108, 102 p., https://doi.org/10.3133/sir20195108.

Rangel Medina, M., Montijo González, A., 2011. Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Río Santa Cruz, Estado de Sonora, Primera Etapa. Hermosillo, Sonora.

Rangel, M., Grijalva, F., Sosa, O., Ochoa, J.A., Minjárez Sosa, J.I., Monreal Saavedra, R., 2005. Atlas de aguas subterráneas y red de monitoreo piezométrico del Estado de Sonora: Reporte final de Convenio, para CONAGUA.

Sanchez, R., y Eckstein, G. 2020. Groundwater management in the borderlands of Mexico and Texas: The beauty of the unknown, the negligence of the present, and the way forward. Water Resources Research, 56, e2019WR026068. https://doi.org/10.1029/2019WR026068

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2013. Estrategia Nacional para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Recuperado de https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001596.pdf

Shamir, E., Georgakakos, K., Graham, N., Wang, J., 2005. Generation and Analysis of Likely

Shamir, E., Megdal, S.B., Carrillo, C., Castro, C.L., Chang, H.-I., Chief, K., Corkhill, F.E., Eden, S., Georgakakos, K.P., Nelson, K.M., Prietto, J., 2015. Climate change and water resources management in the Upper Santa Cruz River, Arizona. Hydrology. 521, 18–33. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.062

Shamir, E., Meko, D.M., Graham, N.E., Georgakakos, K.P., 2007. Hydrologic Model Framework for Water Resources Planning in the Santa Cruz River, Southern Arizona. J. Am. Water Resources Association, v 43, issue 5, pp. 1155-1170. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00095.x

Shamir, E., Tapia-Villaseñor E.M., Cruz-Ayala M., y Megdal, S.B. "A Review of Climate Change Impacts on the USA-Mexico Transboundary Santa Cruz River Basin." *Water* 13, no. 10. 2021: 1390. https://doi.org/10.3390/w13101390.

Shrader, F.C., Hill, J.M., 1915. Mineral Deposits of the Santa Rita and Patagonia Mountains, Arizona. 373 pp., 25 pls. U.S. Geological Survey (usgs.gov) https://pubs.usgs.gov/publication/b582

Tapia-Villaseñor, E. M., Shamir, E., Megdal, S.B., and Petersen-Perlman, J.D. 2020. "Impacts of Variable Climate and Effluent Flows on the Transboundary Santa Cruz Aquifer." JAWRA Journal of the American Water Resources Association 56 (3): 409–30. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12853.

Tapia-Villaseñor, E.M., Shamir, E., Cruz-Ayala, M., y Megdal, S.B. "Assessing Groundwater Withdrawal Sustainability in the Mexican Portion of the Transboundary Santa Cruz River Aquifer." *Water* 14, no. 2. 2022. 233. https://doi.org/10.3390/w14020233.

Tapia-Villaseñor, E.M., y Megdal S.B. "The U.S.-Mexico Transboundary Aquifer Assessment Program as a Model for Transborder Groundwater Collaboration." *Water* 13, no. 4.2021.: 530. https://doi.org/10.3390/w13040530.

United Nations International Law Commission, 2008. Draft Articles on the Law of Transboundary Aquifers. Official Records of the General Assembly, Sixty-third Session, Supplement No. 10 (A/63/10). Consultado el 26 de Junio de 2019 en: http://legal.un.org/ilc/texts/instruments/english/draft_articles/8_5_2008.pdf

US Congress, 1995, Public Law 104-59: National Highway System Designation Act of 1995: Washington, DC, USA. Consultado el 26 de Junio de 2020 en: https://www.congress.gov/104/plaws/publ59/PLAW-104publ59.pdf

Vandervoet, P., 2009. TAAPing the sources: Santa Cruz database creation for the Transboundary Aquifer Assessment Program: Santa Cruz River Researchers' Day, Tucson, Ariz., 27 Marzo, 2009.

Vikre, P.G., Graybeal, F.T., Fleck, R.J., Barton, M.D., Seedorff, E., 2014. Succession of Laramide Magmatic and Magmatic-Hydrothermal Events in the Patagonia Mountains, Santa Cruz County, Arizona. Economic. Geology. 109, 1667–1704.

Wiken, E., Jiménez Nava, F., Griffith, G., 2011. North American Terrestrial Ecoregions—Level III. Commission for Environmental Cooperation, Montreal, Canada.

Wilson, S.E., Malhotra, D., Osterberg, M., 2016, Mineral Resource Estimate: Arizona Mining Inc Hermosa Taylor Deposit, Santa Cruz County, Arizona. Metal Mining Consultants. Technical Report NI 43-101.

World Meteorological Organization (WMO), 2012. International Glossary of Hydrology, WMO-No. 385, 461 pp

2. FISIOGRAFÍA

2.1. Introducción y Fuentes de Datos

Este capítulo proporciona una revisión de la información sobre fisiografía, suelos, vegetación, uso y cobertura de suelo TSCAS, por sus siglas en inglés). TSCAS se refiere a las áreas comprendidas dentro de la divisoria topográfica de la cuenca que incluye cadenas montañosas y cualquier acuífero rocoso dentro de las mismas. Los análisis cartográficos y topográficos se realizaron utilizando un sistema de información geográfica (SIG). Los análisis fisiográficos incluyen información sobre accidentes geográficos, elevación y provincias fisiográficas. Las áreas que pertenecen a la misma provincia pueden tener geología, clima, suelos y vegetación similares. Debido a estas similitudes, estas áreas pueden tener características similares con respecto al agua subterránea, como el tipo de acuífero, los procesos de recarga y los balances de agua. La comprensión del comportamiento de los acuíferos requiere el conocimiento de la distribución de los suelos y la vegetación porque generalmente tienen un gran efecto en las características de infiltración y escurrimiento. Por ejemplo, los suelos con menor permeabilidad, como las arcillas, tienden a reducir la infiltración y recarga mejorando el escurrimiento. Sin embargo, si el tipo de vegetación es densa, como en un pastizal o un bosque, el escurrimiento puede reducirse. Las bases de datos sobre el uso y cobertura de suelo (LULC, por sus siglas en inglés) consisten en clasificaciones del uso de suelo predominante o tipo de vegetación en un lugar determinado. Similar a la información de suelo y vegetación, LULC se puede utilizar para mejorar las estimaciones de permeabilidad. Por ejemplo, las áreas altamente desarrolladas tendrán una mayor proporción de superficies impermeables, como carreteras y techos, que las áreas boscosas. LULC también se puede usar para establecer la ubicación y el tamaño de áreas agrícolas, industriales y metropolitanas que, a su vez, se pueden usar para estimar la ubicación y la magnitud del uso del agua y las ubicaciones de posibles zonas con problemas de calidad del agua.

2.2. Provincias fisiográficas, topografía y accidentes geográficos

El TSCAS está ubicado en la Provincia Fisiográfica de Cuencas y Cordilleras de América del Norte (Figura 2.1). El Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI) utiliza una nomenclatura diferente para la parte mexicana del área de estudio, designando la provincia fisiográfica como Sierras y Llanuras del Norte (INEGI, 2001). Esta provincia está formada principalmente por cadenas montañosas separadas por valles paralelos orientados de norte a sur, que contienen acuíferos aluviales delimitados por cadenas montañosas y fallas. Las rocas volcánicas ácidas y las rocas sedimentarias predominan en las regiones montañosas. Los materiales sedimentarios continentales (conglomerado terciario, aluviones terciarios y cuaternarios) son abundantes en los valles (consulte el Capítulo 4 para obtener información geológica detallada) (INEGI, 2001). Al este del TSCAS se encuentra la cuenca del Río San Pedro. Al sureste, sur y suroeste se encuentran las cuencas del Río Concepción-Arroyo Cocóspera (acuíferos Cuitaca y Cocóspera) y la cuenca del Río Asunción

(acuífero Río Alisos). Al oeste se ubica la Cuenca del Río Magdalena (acuífero Río Altar).

La altitud en el TSCAS varía desde aproximadamente 920 m en la parte más al norte de la cuenca hasta aproximadamente 2,880 m en las Montañas Santa Rita ubicadas al norte de Nogales, Arizona (Archuleta et al., 2017; USGS, 2017). Al sur de las Montañas Santa Rita se encuentra una cadena montañosa llamada Montañas Patagonia en Arizona y Sierra San Antonio en Sonora, alrededor del extremo sur donde fluye el Río Santa Cruz. El límite noreste del área de estudio está formado por las Colinas Canelo (Canelo Hills), que son una cadena montañosa con tendencia noroeste a sureste. El punto más oriental del área de estudio se encuentra en las Montañas Huachuca, y el límite sureste está formado por la Sierrita del Álamo y la Sierra el Chivato. La Sierra El Pinito forma el límite suroeste del área de estudio, así como el límite oficial entre los acuíferos Río Santa Cruz y Nogales en Sonora. La extensión norte de la Sierra El Pinito en Arizona se llama Mount Benedict. El límite occidental está compuesto de sur a norte por la Sierra Pajarito, Sierra Atascosa, Sierra Tumacácori y Cerro Colorado. Las Sierritas comprenden la parte noreste del área de estudio.

Se utilizó un SIG y el conjunto de datos de elevación nacional de USGS (USGS, 2012) disponible para Arizona y Sonora para determinar la distribución y magnitud de las pendientes en el área de estudio. Las pendientes varían de 0° a 65°, con las pendientes más pronunciadas en Sierra El Pinito, Sierra San Antonio y las Montañas Patagonia. La cobertura del suelo varía a lo largo del área de estudio, con bosques de hoja perenne y bosques caducifolios dominantes en las elevaciones más altas, pastizales naturales en los valles de elevación media y matorrales en los valles de elevación baja. El desarrollo urbano de baja a alta intensidad ocurre principalmente en la cuenca de Nogales, Sonora y Nogales, Arizona y a lo largo del corredor inferior del Río Santa Cruz al norte de Río Rico, Arizona.

El Valle de San Rafael en Arizona es rural con ganadería y tierras públicas como uso de suelo principal (ADEQ, 2003). Los principales usos de suelo en el Área de Manejo Activa de Santa Cruz (SCAMA, por sus siglas en inglés) en Arizona son doméstico, comercial, industrial, agrícola y ganadero. Más de la mitad del territorio en SCAMA está administrado por el gobierno federal y estatal (ADWR, 2009). Alrededor del 43% de la tierra en esta parte del área de estudio es de propiedad privada y el 21% es estatal. Estas tierras se utilizan principalmente para ganadería privada con arrendamientos de pastoreo en tierras de fideicomiso estatal. El Servicio Forestal de los EE. UU. (USFS, por sus siglas en inglés) administra el 36 % de las tierras dentro del AMA, principalmente en el área montañosa, para recreación, ganadería y conservación de recursos naturales (Villareal et al., 2011). Al igual que en el AMA de Santa Cruz, las tierras dentro del SCRAS tienen una combinación de usos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas (Minjarez et al., 2011, GAS-CONAGUA, 2024a).

2.3. Suelos

La comprensión de las propiedades hidráulicas del suelo mejora el conocimiento de la hidrología y la geoquímica de la cuenca. Los principales factores naturales que afectan el desarrollo de los suelos y sus

propiedades hidráulicas son el clima, los organismos, el material de origen, la topografía y el tiempo (Departamento de Agricultura de Estados Unidos., 2019b). Estos factores pueden afectar las propiedades hidráulicas del suelo. Por ejemplo, el material de origen (roca madre) del que se derivan los minerales del suelo puede afectar la conductividad hidráulica, lo que a su vez afecta la infiltración. Por ejemplo, los suelos derivados de arenisca en lugar de limolita tenderán a contener menos arcilla, lo que probablemente conducirá a una mayor permeabilidad. La topografía (caracterizada por la pendiente y el aspecto) puede afectar el espesor, la textura y el contenido de materia orgánica de los suelos (USDA, 2019b). Los suelos depositados en laderas empinadas y en elevaciones más altas son delgados y pedregosos y pueden contener afloramientos rocosos. Los suelos depositados en las llanuras aluviales son generalmente más profundos y de textura más fina.

Los organismos pueden aumentar el contenido de materia orgánica del suelo mediante la adición de raíces, hojas y materia fecal, entre otras cosas. También pueden aumentar la porosidad a través de madrigueras o la descomposición de las raíces. El clima afecta los suelos a través de la temperatura y la precipitación, por ejemplo, el momento y la magnitud de los procesos de control de la temperatura y la precipitación, como la congelación y descongelación, la tasa de descomposición de la materia orgánica y la meteorización de los minerales.

Aunque la información sobre la distribución espacial de los suelos contribuye a la comprensión de los procesos hidrológicos como la infiltración, la recarga y la evapotranspiración, actualmente no se dispone de un sistema binacional unificado de clasificación de suelos. En Estados Unidos, la clasificación utilizada se derivó del Mapa general de suelos del Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA, por sus siglas en inglés) (USDA, 2019b). También están disponibles conjuntos de datos de mayor resolución, como la base de datos geográfica estatal de suelos (STATSGO, por sus siglas en inglés) y la base de datos geográfica de estudios de suelos (SSURGO, por sus siglas en inglés) (USDA, 2019c). En México, los levantamientos de suelos se realizan utilizando los métodos de la Sociedad Internacional de Ciencias de Suelo publicados por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (Base de referencia del grupo de trabajo de la ISSS, 1998). Como resultado, los sistemas de clasificación de suelos de los Estados Unidos y México actualmente son incompatibles. La compatibilidad de la clasificación binacional de suelos requeriría levantamientos binacionales sujetos a un acuerdo que establezca la resolución espacial del sistema y los métodos de muestreo, mapeo y análisis. El tiempo requerido para el trabajo de campo dependería de los métodos utilizados y la resolución del mapa. Para este informe, ambos métodos de clasificación de suelos están documentados e ilustrados (Figura 2.2).

En el SCRAS se identificaron seis tipos de suelos (Minjarez et al., 2011): Cambisol, Feozem, Lithosol, Luvisol, Regosol y Vertisol, combinados con subunidades de tipo crómico, háplico, éutrico y calcárico (Figura 2.2). A continuación, se describen las unidades de suelo y sus subtipos:

Cambisol (Bc+Re /1/G): Este suelo es un Cambisol crómico que se desarrolla con un subtipo de Regosol éutrico de clase textural gruesa y fase física gravosa. El subsuelo es diferente en color y textura que la capa superficial. Tiende a ser oscuro, pobre en nutrientes y de más de 25 cm de espesor cuando está presente. La subclasificación crómica indica que cuando está húmedo, es de color marrón oscuro a rojo opaco. El regosol éutrico se forma a través de la descomposición física y química de los materiales originales; su origen es el resultado de la meteorización y erosión de rocas topográficamente más altas. Es rico en nutrientes (Ca, Mg, K y Na), contiene un alto porcentaje de arena en los 30 cm superiores y un alto porcentaje de grava en los primeros 100 cm de profundidad que van desde 0.2 a 7.5 cm en el eje largo.

Feozem (Hh+Re /2/G): Este suelo de tipo Feozem háplico y subtipo Regosol éutrico es cascajoso y de textura media con una capa superficial oscura rica en materia orgánica y nutrientes o bases de Ca, Mg, K y Na. Los regosoles éutricos pueden formarse a partir de una variedad de fuentes, incluida la erosión de rocas ígneas ácidas y básicas, así como conglomerados, lutitas-areniscas y residuos coluviales. Es un suelo rico en nutrientes que localmente presenta horizontes cálcicos. Es similar al material original, excepto que tiene una capa superficial de color marrón amarillento o marrón rojizo, que pertenece a un horizonte A ócrico y carece de estructura. Este tipo de suelo suele ser pobre en materia orgánica, con abundante arena, alto contenido de arcilla, y se caracteriza por un porcentaje de sodio intercambiable superior al 15%. Su textura varía de arenosa a franco arenosa.

Litosol (I+Re+Rc /1): Este suelo es un Litosol crómico de subtipo éutrico y calcárico grueso de espesor inferior a 10 cm. Los regosoles pueden formarse a partir de una variedad de fuentes, incluida la erosión de rocas ígneas ácidas y básicas, así como conglomerados, lutitas, areniscas y coluvión residual. Es un suelo rico en nutrientes que localmente contiene un horizonte cálcico. Es muy similar al material de origen, excepto que tiene una capa superficial de color marrón amarillento o marrón rojizo que pertenece al horizonte A ócrico y carece de estructura. Suele ser muy pobre en materia orgánica, con abundante arena y se caracteriza por un porcentaje de sodio intercambiable superior al 15%. Su textura varía de arenosa a franco arenosa y con alto contenido de arcilla. El subtipo Regosol cálcico presenta poca meteorización y se encuentra diferenciado del material de original; es arenoso y cascajoso con texturas que tienden a franco arenosas en la superficie volviéndose más fino a un franco arcilloso en los horizontes mayores.

Luvisol (Lc+Re /2/L): Este suelo es un Luvisol crómico de subtipo regosol éutrico, clase textural media y fase física lítica. Son suelos con acumulación de arcilla en profundidad y generalmente fértiles; el color es marrón oscuro a rojizo cuando está humedo. Contienen un horizonte B argílico, y son ligeramente ácidos y bajos en materia orgánica. El subtipo regosol éutrico se forma por la meteorización de rocas ácidas y básicas, conglomerados y lutitas arenosas; puede tener orígenes aluviales, coluviales o incluso eólicos; tiene proporciones similares de arcilla, limo y arena

en los primeros 30 cm, con roca dura a menos de 50 cm de profundidad.

Regosol (Re+Rc /1/n): El regosol éutrico es un subtipo calcárico de clase textural gruesa con una fase química sódica. Estos suelos pueden formarse a partir de la erosión de rocas ígneas ácidas y básicas, así como de conglomerados y lutitas arenosas, o de material residual aluvial, coluvial o eólico. Es un suelo rico en nutrientes que localmente presenta horizontes cálcicos; es similar al material de origen, excepto que tiene una capa superficial de color marrón amarillento o marrón rojizo, que pertenece al horizonte A ócrico y carece de estructura. Este tipo de suelo suele ser pobre en materia orgánica, con abundante arena, y se caracteriza por un porcentaje de sodio intercambiable superior al 15%. Su textura varía de arenosa a franco arenosa.

Vertisol (Vc /3G): Los suelos tipo Vertisol se caracterizan por grietas anchas y profundas que aparecen durante la estación seca; tienen un alto contenido de arcilla, pegajosos cuando están húmedos y muy duros cuando están secos, con poca susceptibilidad a la erosión. Contienen una arcilla pesada, oscura y con grava en cualquier capa dentro de los 50 cm superiores; en la estación seca sin riego, se observan grietas visibles hasta profundidades de menos de 50 cm. Las grietas superficiales también pueden formarse cuando están muy húmedas. Contienen gravas que miden típicamente entre 0.2 y 7.5 cm a profundidades inferiores a 100 cm que pueden limitar o impedir el uso de maquinaria agrícola.

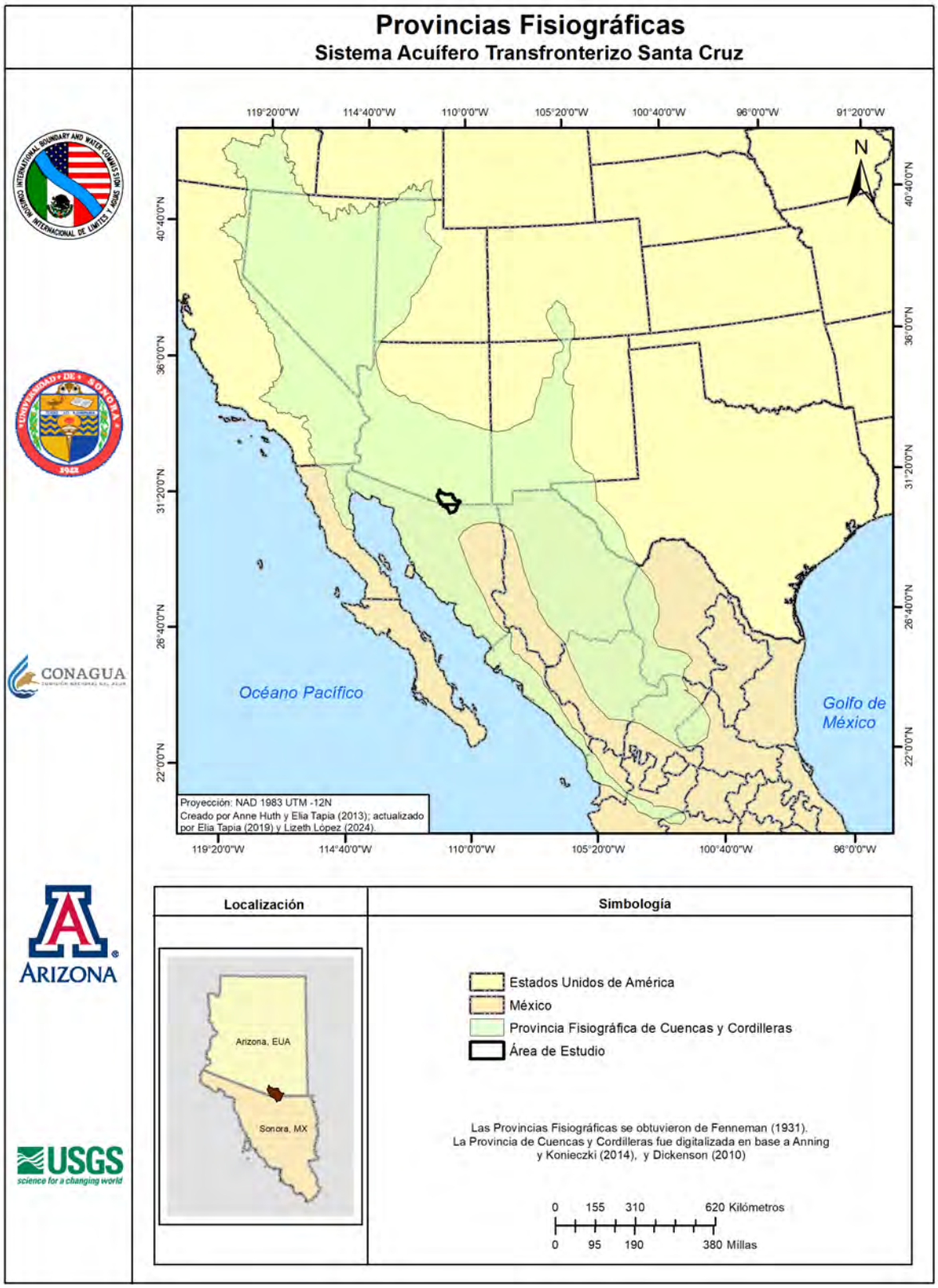


Figura 2.1 Provincias Fisiográficas en el Sistema Transfronterizo de Santa Cruz.

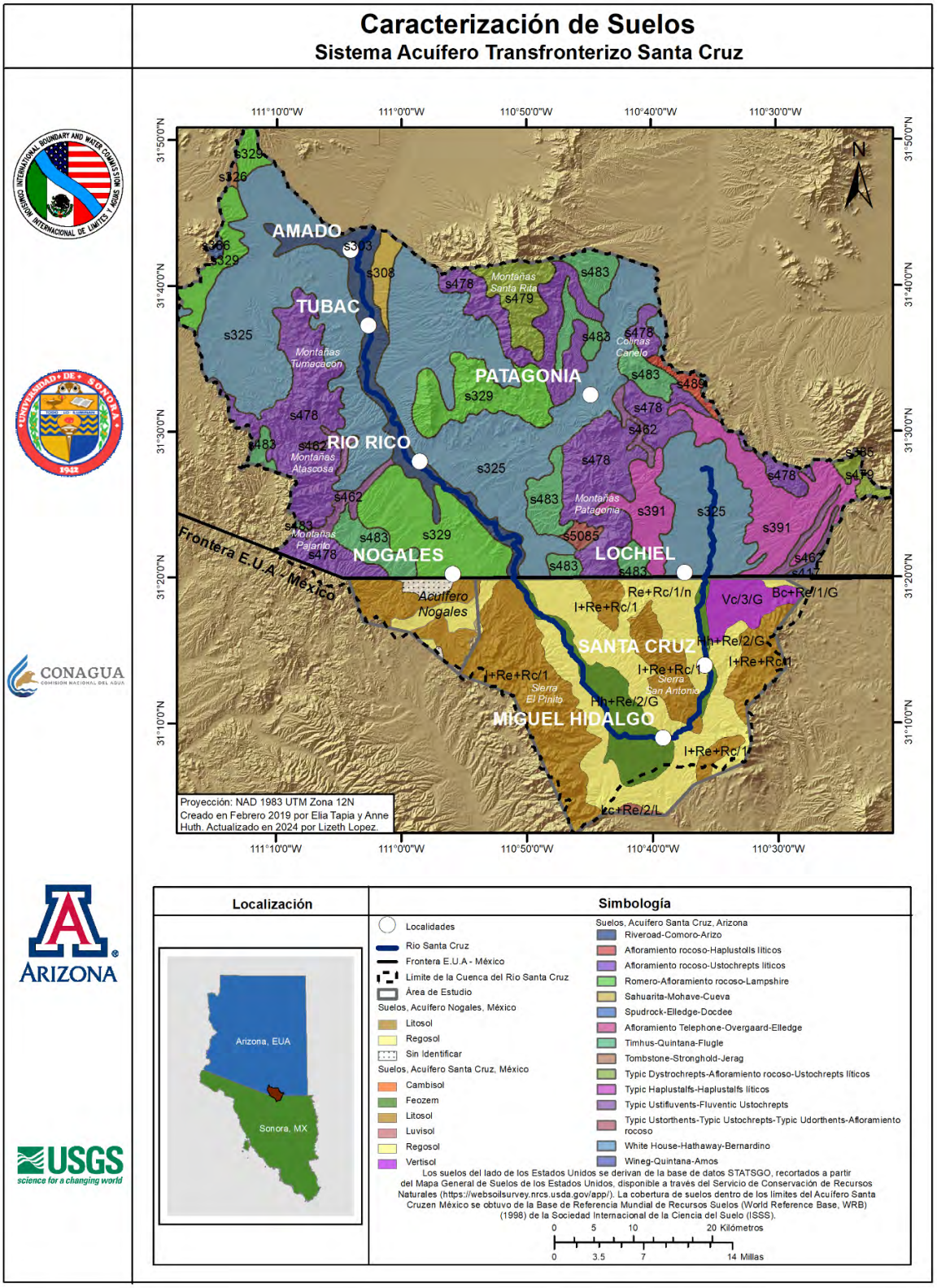


Figura 2.2 Tipo de suelo en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

En el Acuífero Santa Cruz en Arizona (SCAA, por sus siglas en inglés), los suelos se clasifican por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés), que es una agencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Los suelos se clasifican en grupos o asociaciones de tipos de suelo. Hay quince tipos de suelo diferentes en el lado de la cuenca de Arizona que fueron determinados por variables tales como topografía, apariencia, precipitación, temperatura, vegetación, roca generadora y otros factores. La siguiente lista describe los diez tipos de suelo principales (USDA, 1979; USDA, 2019a):

s303 Riveroad-Comoro-Arizo: Esta asociación consiste en una mezcla de tres series de suelos. Las series Riveroad y Comoro son suelos muy profundos. Se ubican sobre planicies de inundación y abanicos aluviales, y tienen pendientes de 0 a 8 por ciento. La precipitación media anual es de unos 355 milímetros. Los suelos de la serie Riveroad se forman en aluviones de arroyos de fuentes mixtas. Los suelos comoranos están poco o excesivamente drenados y están formados por aluviones estratificados. La serie Arizo también se compone de suelos muy profundos formados en aluviones mixtos. Están ubicados en abanicos aluviales recientes, abanicos insertados en abanicos más antiguos, faldas de abanico, terrazas de arroyos y llanuras aluviales de arroyos y canales intermitentes. Tienen pendientes que oscilan entre 0 y 15%, una precipitación media anual que oscila entre 180 y 510 mm y una temperatura media anual del aire de entre 14 y 18 °C.

s489 Afloramiento rocoso-Haplustolls líticos: Esta asociación se ubica sobre cerros y montañas. Se compone de un 50 a un 70% de afloramientos rocosos y de un 30 a un 50% de Haplustoles líticos. Por lo general, las pendientes oscilan entre el 15% y el 60%, pero algunas son tan bajas como el 5% y tan altas como el 100%. En estos suelos, la profundidad a una capa que restringe el crecimiento de las raíces de las plantas es mayor a 60 cm. El suelo no permanece húmedo y hay poca agua disponible hasta una profundidad de 60 cm. Tiene un bajo potencial de expansión o contracción.

s329 Romero-Afloramiento rocoso- Lampshire: Esta asociación de suelos consiste en una mezcla de dos series de suelos con afloramientos rocosos. La serie Romero está formada por suelos someros o muy someros que se formaron en aluviones de taludes a partir esquisto o roca granítica. Se encuentran en piedemontes, cerros y montañas con pendientes que van del 0 al 70%. La serie Lampshire consiste en suelos muy poco profundos y poco profundos, bien drenados que se formaron en aluviones y coluviones de rocas ígneas. Se ubican en cerros y montañas con pendientes de 0 a 90%. En esta asociación de suelos, la precipitación media anual es de alrededor de 355 mm y la temperatura media anual del aire es de aproximadamente 17°C.

s308 Sahuarita-Mohave-Cueva: Esta asociación de suelos consta de tres series. Todos los suelos están bien drenados. Los suelos de la serie de cuevas son de muy poca a poca profundidad, con una capa dura de caliche y pendientes de entre 0 y 35%. Las series Mohave y Sahuarita son muy profundas y tienen pendientes de entre 0 y 8%. Los suelos de la serie Sahuarita se derivan de calizas, esquistos, granitos y filitas. Dependiendo de la serie, los suelos forman

aluviones en terrazas de abanico, terrazas de arroyos, piedemonte y suelos de cuencas. La precipitación media anual oscila entre 200 y 280 mm y la temperatura media anual del aire entre 17 y 20°C.

s386 Spudrock-Elledge-Docdee: Esta asociación de suelos consiste en una mezcla de tres series de suelos. Todos los suelos presentan drenaje de moderado a bueno. Los suelos de las series Spudrock y Elledge son moderadamente profundos. Se ubican sobre cerros y montañas, formándose en aluviones de taludes mixtos. Los suelos Docdée se ubican en cimas de cerros y laderas de montañas, formados por andesitas y areniscas. Las pendientes de la serie Spudrock varían de 15 a 85%. Los suelos tipo Elledge varían del 2 al 50%, y las pendientes de los suelos Docdée varían del 8 al 75%. La precipitación media anual oscila entre 508 y 635 mm, y la temperatura media anual del aire entre 9.4 y 11°C.

s385 Afloramiento Rocoso Telephone-Overgaard- Elledge: Esta asociación de suelos consta de tres series de suelos y afloramientos rocosos. Todos los suelos varían de bien a moderadamente bien drenados. Los suelos Telephone se ubican en colinas con pendientes de entre 9 y 60%, y están formados por areniscas no calcáreas. Los suelos Overgaard se forman en aluviones mixtos y se encuentran en terrazas de arroyos altos, mesetas y laderas con pendientes que van desde 0 a 35%. Los suelos Elledge se forman en aluviones de pendiente y se ubican en cerros y montañas con pendientes de 2 a 50%. La precipitación media anual de esta asociación oscila entre 430 y 560 mm, y la temperatura media anual del aire entre 7 y 13°C.

s483 Timhus-Quintana-Flugle: Esta asociación se compone de suelos profundos y muy profundos que varían de bien a excesivamente bien drenados con permeabilidad moderada o moderadamente lenta. Los suelos de la serie Timhus se formaron sobre conos de ceniza a partir de sedimentos arrastrados por el viento y tienen pendientes de 20 a 50%. Los suelos de la serie Quintana se encuentran en tierras altas con pendientes de 0 a 20% y están formados por calizas, areniscas calcáreas blandas y esquistos. Los suelos de la serie Flugle se formaron en materiales eólicos y abanico aluvial, derivados de esquistos y arenisca y se encuentran en cimas de mesetas, laderas de buzamiento de colinas y crestas, así como terrazas de abanico y remanentes de abanico en las laderas de los valles. La precipitación media anual de esta asociación oscila entre 355 y 460 mm y la temperatura media anual del aire entre 9 y 11°C.

s326 Tombstone-Stronghold-Jerag: Esta asociación consiste en suelos que varían de bien drenados a excesivamente bien drenados. Los suelos Tombstone (muy profundos) y Stronghold (profundos) se forman en abanicos aluviales en terrazas de arroyos y abanicos en terrazas con pendientes de 0 a 65%. La serie Jerag consiste en suelos someros con pendientes que van del 0 al 10%, que se formaron en aluviones mezclados con arenas eólicas sobre piedemontes de abanicos y remanentes de abanicos. La serie Jerag es moderadamente permeable por encima y por debajo del horizonte petrocálcico de permeabilidad baja. La precipitación media anual de esta asociación oscila entre 330 y 355 mm, y la temperatura media anual del aire entre 15.5 y 17°C.

s325 White House-Hathaway-Bernardino: Esta asociación de tres series de suelos consiste en suelos muy profundos y bien drenados. Se encuentra en terrazas de abanico con pendientes de 0 a 60%. Los suelos White House y Hathaway se formaron en abanicos aluviales derivados de rocas ígneas y sedimentarias. La precipitación media anual de esta asociación oscila entre 355 y 460 mm, y la temperatura media anual del aire varía alrededor de 16.5°C.

s417 Wineg -Quintana-Amos: Esta asociación está formada por suelos profundos y muy profundos, bien drenados y con pendientes de 0 a 20%. Los suelos Wineg se forman en aluviones mixtos, derivados principalmente de granito, basalto, esquisto y arenisca en abanicos y llanuras aluviales. Los suelos Quintana están formados por calizas, areniscas calcáreas blandas y lutitas en las partes altas. Los suelos Amos están formados por material meteorizado a partir de lutitas, limolitas y areniscas calcáreas. La precipitación media anual de esta asociación oscila entre 380 y 480 mm y la temperatura media anual del aire ronda los 11°C.

2.4. Vegetación y Cobertura Terrestre

La vegetación y los datos de uso y cobertura del suelo (LULC) se utilizan para diversos fines en el análisis hidrológico. Los tipos de vegetación pueden emplearse para generar estimaciones de parámetros de evapotranspiración para modelos de flujo de agua subterránea (Langevin et al., 2017) y también pueden ser importantes en modelos de agua superficial para la estimación de un parámetro de rugosidad hidráulica, relacionado con la resistencia al flujo causada por la fricción del agua al desplazarse sobre la superficie del terreno y a través de los cauces (U.S. Army Corps of Engineers, 2016). La densidad y el tipo de vegetación pueden modificar de manera importante la rugosidad y, por lo tanto, la velocidad del flujo y el caudal. Los tipos de vegetación tienden a simplificarse en comparación con los mapas de vegetación.

En el TSCAS existen 31 tipos de vegetación (Wallace et al., 2011) de los cuales el Matorral Alto de Mesquite Apacherian-Chihuahuan, el Encinal Madreano y el Pastizal y Estepa Semidesértico Apacherian-Chihuahuan son los tipos predominantes (Figura 2.3). Estos tres tipos se describen brevemente a continuación.

La vegetación tipo **Matorral Alto de Mesquite Apacherian-Chihuahuan** se presenta como matorrales que se concentran en la transición entre pastizales y matorrales en las estribaciones y el piedemonte en el desierto de Chihuahua. Los suelos se derivan típicamente del aluvión, a menudo con grava sin un horizonte de suelo argílico o cálcico bien desarrollado que limitaría el almacenamiento de la precipitación invernal en las capas más profundas del suelo. Prosopis spp. y otros arbustos de raíces profundas aprovechan esta humedad profunda del suelo que no está disponible para las hierbas y los cactus. La cantidad de hierba suele ser baja. Durante el último siglo, el área ocupada por este tipo de vegetación ha aumentado debido a la conversión de pastizales desérticos como resultado de la sequía, el pastoreo excesivo del ganado y los cambios en la frecuencia de los incendios.

La vegetación tipo **Encinal Madreano** se presenta en cañones y en piedemontes, bajadas y

mesetas de la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental en México, extendiéndose hacia el norte hasta Texas, el sur de Nuevo México y Arizona. Estos bosques están dominados por encinos perennifolios madrenses a lo largo de una zona de transición de baja pendiente, generalmente situada a menor altitud que el bosque y matorral de pino-encino madreano y el bosque de pino y enebros madreanos. Los grupos de menor altitud, como este, suelen corresponder a bosques abiertos o sabanas que, en elevaciones más bajas, transicionan hacia pastizales desérticos, chaparral o matorral desértico. Este tipo de vegetación puede extenderse a elevaciones más bajas a lo largo de los drenajes.

La vegetación de tipo **pastizales y estepas semidesérticas de Apacherian-Chihuahuan** es un pastizal desértico ampliamente definido, una mezcla de arbustos, suculentas o una sabana de árboles xeromórficos que es típica de las zonas fronterizas de Arizona, Nuevo México, Sonora y Chihuahua. Se encuentra donde ocurren incendios frecuentes en bajadas de pendiente suave adyacentes a montañas, mesetas y piedemontes de mayor pendiente. Se caracteriza típicamente por diversas gramíneas perennes. Debido al pastoreo intensivo y otros usos de la tierra, muchas de las áreas históricas de pastizales y sabanas del desierto se han convertido en matorral desértico suculento chihuahuense.

Los datos de LULC incluyen información sobre la vegetación y la intensidad del desarrollo. En análisis y modelado hidrológico, LULC puede usarse para estimar la rugosidad, así como la permeabilidad superficial. Los cambios en LULC para el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz para el período de 1979 a 2009 fueron estimados por Villarreal et al., (2011). Su análisis se realizó utilizando imágenes Landsat calibradas y corregidas, seguido de la aplicación de modelos de árboles de clasificación y regresión divididos en 14 clases LULC (Figura 2.4).

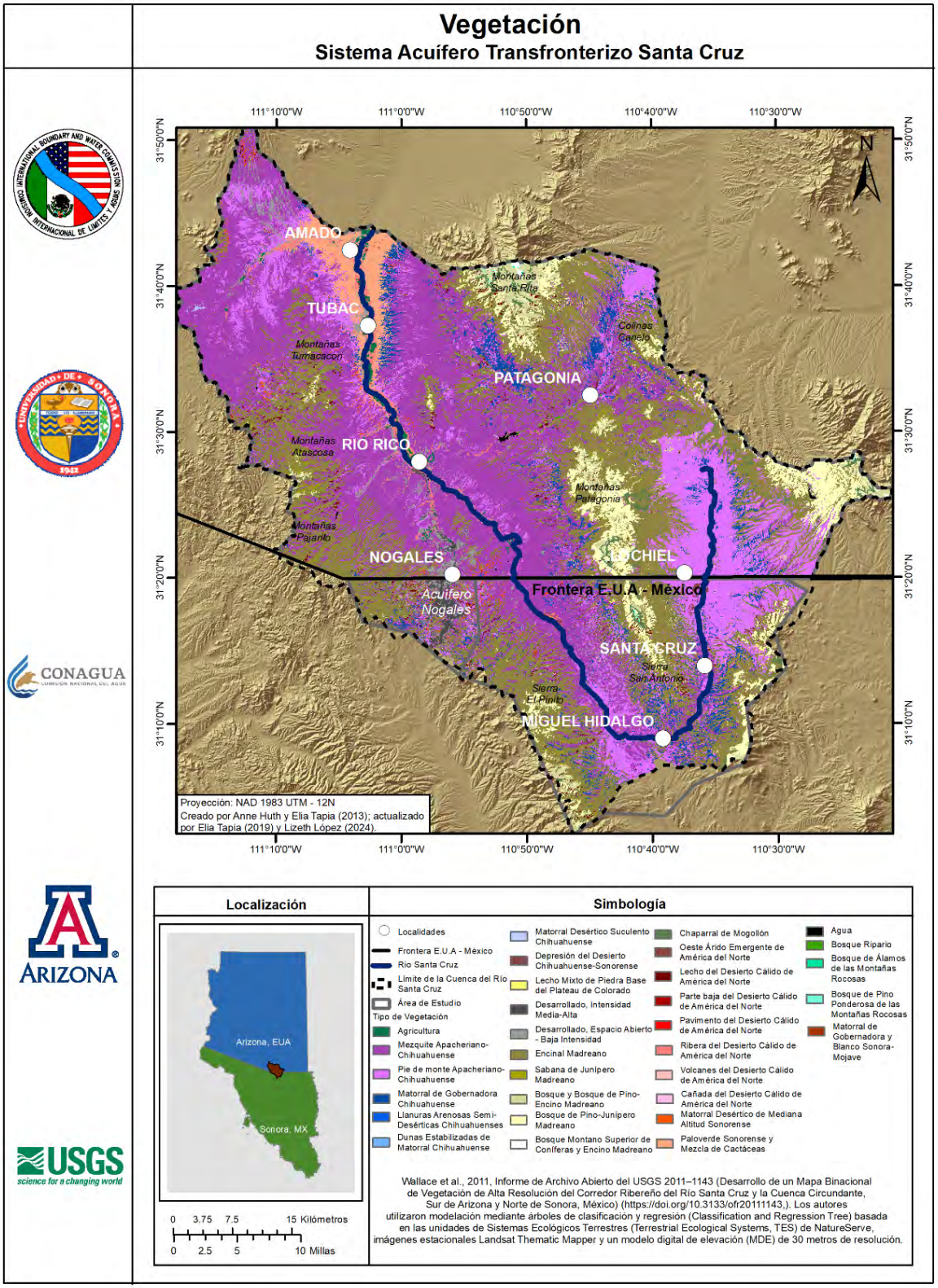


Figura 2.3 Vegetación en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (modificado de Wallace et al., 2011).

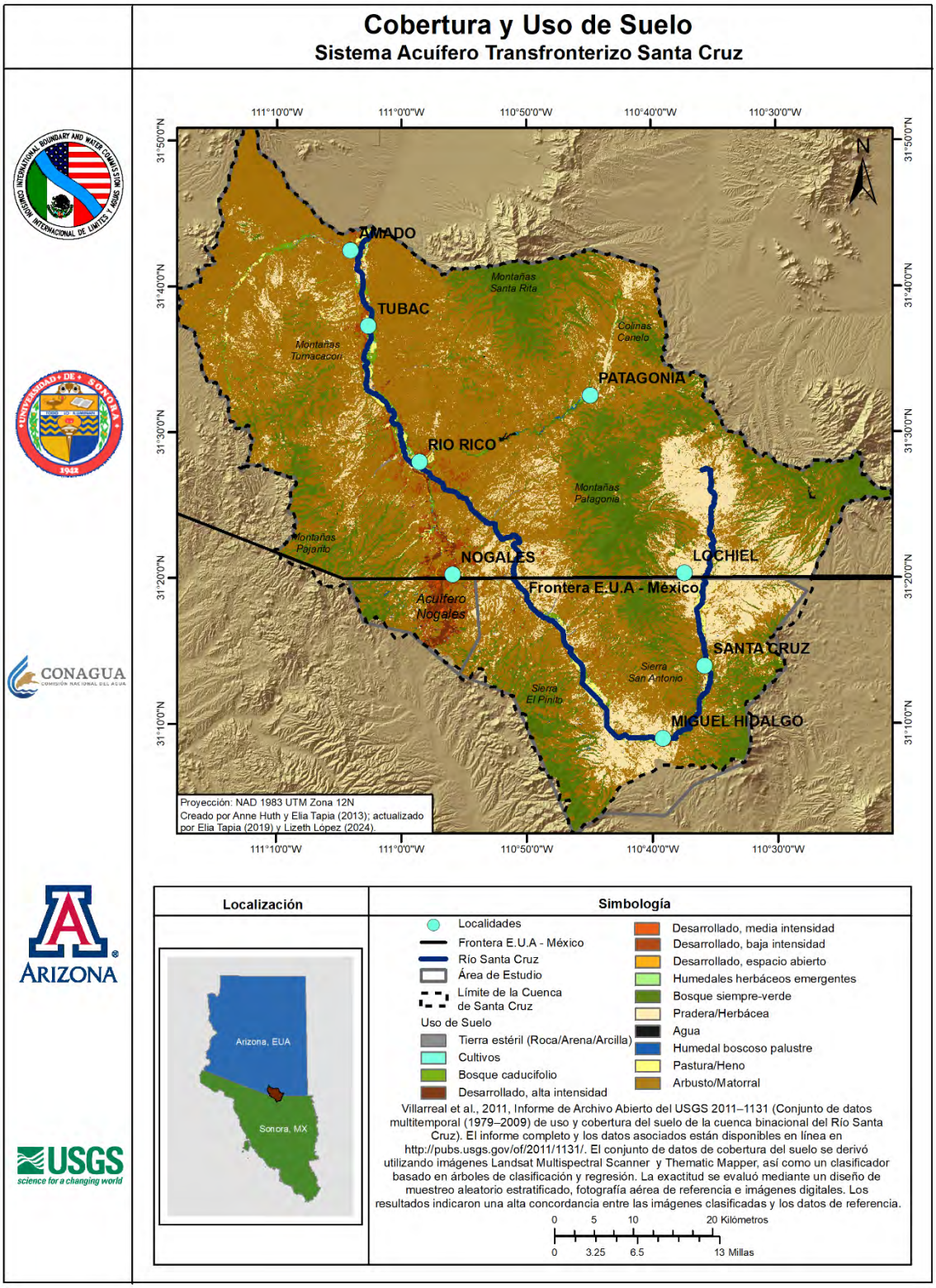


Figura 2.4 Cobertura del suelo en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (modificado de Villarreal et al., 2011).

Bibliografía

Anning, D.W, Flynn, M.E., 2014. Dissolved-solids sources, loads, yields, and concentrations in streams of the conterminous United States: U. S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2014-5012, 101 p., http://dx.doi.org/10.3133/sir20145012.

Anning, D.W., Konieczki. A.D., 2005. Classification of Hydrogeologic Areas and Hydrogeologic Flow Systems in the Basin and Range Physiographic Province, Southwestern United States. Report 1702, U.S. Geological Survey Professional Paper. https://doi.org/10.3133/pp1702 .

Archuleta, C.M., Constance, E.W., Arundel, S.T., Lowe, A.J., Mantey, K.S., Phillips, L.A., 2017. The National Map seamless digital elevation model specifications: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 11, chap. B9, 39 p., https://doi.org/10.3133/tm11B9.

Arizona Department of Environmental Quality (ADEQ), 2003. Ambient Groundwater Quality of the San Rafael Basin: A 2002 Baseline Study. Open File Report 2003-01.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2009. Arizona Water Atlas, Volume 2: Eastern Plateau Planning Area: 188p.

Dickinson, W.R., 2010. The Basin and Range Province as a composite extensional domain. International Geology Review, 44(1), 1-38. https://doi.org/10.2747/0020-6814.44.1.1

Fenneman, N.M., 1931., Physiography of Western United States: New York, McGraw-Hill Book Co., Inc.

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024a, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2615) Río Santa Cruz, Estado de Sonora. 30p. Consultado el 4 de Agosto de 2025 en:https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2615.pdf

Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), 2001. Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas.

ISSS Working Group Reference Base, 1998. World reference base for soil resources: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome: accessed July 27, 2020, en http://www.fao.org/3/W8594E/w8594e00.htm

Langevin, C.D., Hughes, J.D., Banta, E.R., Niswonger, R.G., Panday, S, and Provost, A.M., 2017. Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A55, 197 p., https://doi.org/10.3133/tm6A55.

Minjarez Sosa, I., Monreal Saavedra, R., Grijalva Noriega, F. J., Ochoa Granillo, J. A., Tapia Villaseñor, E. M., Rangel Medina, M., Montijo González, A., 2011. Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Río Santa Cruz, Estado de Sonora, Primera Etapa. Hermosillo, Sonora.

Natural Resource Conservation Service, United States Department of Agriculture, 2019b/, Soil Formation and Classification. Webpage accessed July 30, 2019, en https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/edu/?cid=nrcs142p2_054278

Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, 2019a. Official Soil Series Descriptions. Accessed August 2, 2019 en https://soilseries.sc.egov.usda.gov/osdname.aspx

Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture, 2019c., U.S General Soil Map (STATSGO2). Accessed June 27, 2019, at https://sdmdataaccess.sc.egov.usda.gov.

Pavlakovich-Kochi, V., 2014. Maquiladora Economy of Nogales and Santa Cruz Co. https://www.azeconomy.org/2014/04/workforce/maquiladora-related-economy-of-nogales-and-santa-cruz-county/

Soil Conservation Service and Forest Service, United States Department of Agriculture (USDA), 1979. Soil Survey of Santa Cruz and Parts of Cochise and Pima Counties, Arizona. 111 p.United States Geological Survey (USGS), 2012. Visor Nacional de Mapas. Consultado el 6 de enero de 2025, en https://apps.nationalmap.gov/viewer/

United States. Geological Survey, (USGS), 2017, The National Map, 2017, productos y servicios de 3DEP: The National Map, página web del Programa de Elevación 3D, consultada el 21 de junio de 2019 en https://nationalmap.gov/3DEP/3dep_prodserv.html.

U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2016. HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual v. 5.0.Villarreal, M.L., Norman, L.M., Wallace, C.S.A., van Riper, C., 2011. A multitemporal (1979-2009) land-use/land-cover dataset of the binational Santa Cruz Watershed: U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1131.

Wallace, C.S.A., Villarreal, M.L., Norman, L.M., 2011. Development of a High-Resolution Binational Vegetation Map of the Santa Cruz River Riparian Corridor and Surrounding Watershed, Southern Arizona and Northern Sonora, Mexico. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1143.

3. CLIMA E HIDROLOGÍA DEL AGUA SUPERFICIAL

3.1. Introducción

Para comprender el funcionamiento de un acuífero, es necesario tener conocimiento sobre el clima y los flujos que controla directamente (precipitación, evapotranspiración, recarga directa) o indirectamente (recarga y descarga a través de cuerpos de agua superficial). En particular, las masas de agua superficial pueden actuar como ventanas a los cambios en los flujos hidrológicos provocados por el clima y también al funcionamiento de los acuíferos frente a esos cambios. Debido a que el agua superficial es visible y accesible, en algunos casos es más fácil y menos costoso estudiarla que el agua subterránea. A largo plazo, el clima es el principal impulsor del ciclo hidrológico, mientras que la variabilidad climática local está controlada por la topografía, la elevación y la relación de estas características con las masas de agua superficial. El clima, junto con la vegetación, los suelos y la geología, controla la cantidad de agua disponible para infiltración, y, en última instancia, para la recarga de los acuíferos. Los efectos antropogénicos, como el cambio climático y las reducciones en la descarga de aguas subterráneas a los arroyos causadas por el bombeo de aguas subterráneas, pueden ocurrir en una o más escalas de tiempo.

El caudal varía en distintas escalas temporales: períodos diarios, estacionales, multianuales y multidecadales. Las variaciones diarias (o “diurnas”) pueden ser impulsadas por factores como la evapotranspiración, el bombeo y la precipitación. Las variaciones estacionales son impulsadas por cambios anuales a escala global en la radiación solar que provocan cambios en los patrones climáticos locales y, por lo tanto, en las precipitaciones. El sureste de Arizona generalmente tiene un patrón climático bimodal con la mayoría de las precipitaciones que se presentan en invierno o verano (Figura 3.2). Como resultado, en el TSCAS (por sus siglas en inglés) hay ciertas épocas del año que suelen ser más secas (por ejemplo, finales de la primavera) y otras épocas del año son más húmedas (el monzón de verano y el invierno). Las sequías multianuales o decadales y los períodos húmedos son impulsados por otros factores menos conocidos, como El Niño-Oscilación del Sur, la Oscilación Decadal del Pacífico y las variaciones en el forzamiento radiativo solar y volcánico (Myhre et al., 2013).

Tradicionalmente, el agua superficial se ha estudiado por separado del agua subterránea, y para ciertos temas, como las inundaciones y la erosión, esto enfoque puede ser considerado válido en gran medida. Sin embargo, cada vez más, las aguas subterráneas y superficiales se estudian como un recurso conectado. Los ríos, arroyos y masas de agua superficial actúan tanto como fuentes de recarga de acuíferos como lugares de descarga de acuíferos. Aunque los manantiales resultan directamente de la descarga de aguas subterráneas, pueden actuar como fuente de recarga en el cauce aguas abajo de la fuente.

En este capítulo revisamos y analizamos información de publicaciones previas relacionadas con el clima y las aguas superficiales. También presentamos y analizamos información de bases de datos que contienen información sobre el clima y la descarga de aguas superficiales.

3.2. Climatología

De acuerdo con el sistema de clasificación climática de Koppen-Geiger (Peel et al., 2007), el clima en el área de estudio se clasifica como semiárido cálido. En la parte de Sonora del área de estudio hay estaciones climatológicas en Nogales y Santa Cruz, ambas operadas por CONAGUA (Figura 3.1). En la porción de Arizona hay estaciones cerca de Nogales, Río Rico y Tubac. La precipitación máxima ocurre típicamente en verano con un segundo período menos intenso de precipitación en invierno (Figura 3.2). La precipitación es el resultado de uno de los tres tipos de patrones climáticos: sistemas frontales de latitud media, que tienden a ocurrir durante los meses de invierno, tormentas eléctricas convectivas, que predominan durante el monzón de verano, y disipación de ciclones tropicales, que ocurren con mayor frecuencia a fines del verano y en el otoño (Wood y Ritchie, 2013; Webb y Betancourt, 1992). Las estimaciones de precipitación y temperatura medias anuales para el período de 1960 a 2018 muestran varios ciclos a largo plazo (Figura 3.3). La temperatura media anual en el TSCAS oscila entre 9°C y 19°C. La temperatura media anual en el mes más frío varía entre -3.6 y 2.0°C, y en el mes más cálido entre 23 y 37°C (Figura 3.4 a la Figura 3.6) (WorldClim Global Climate Data, 2013; Hijmans et al., 2005).

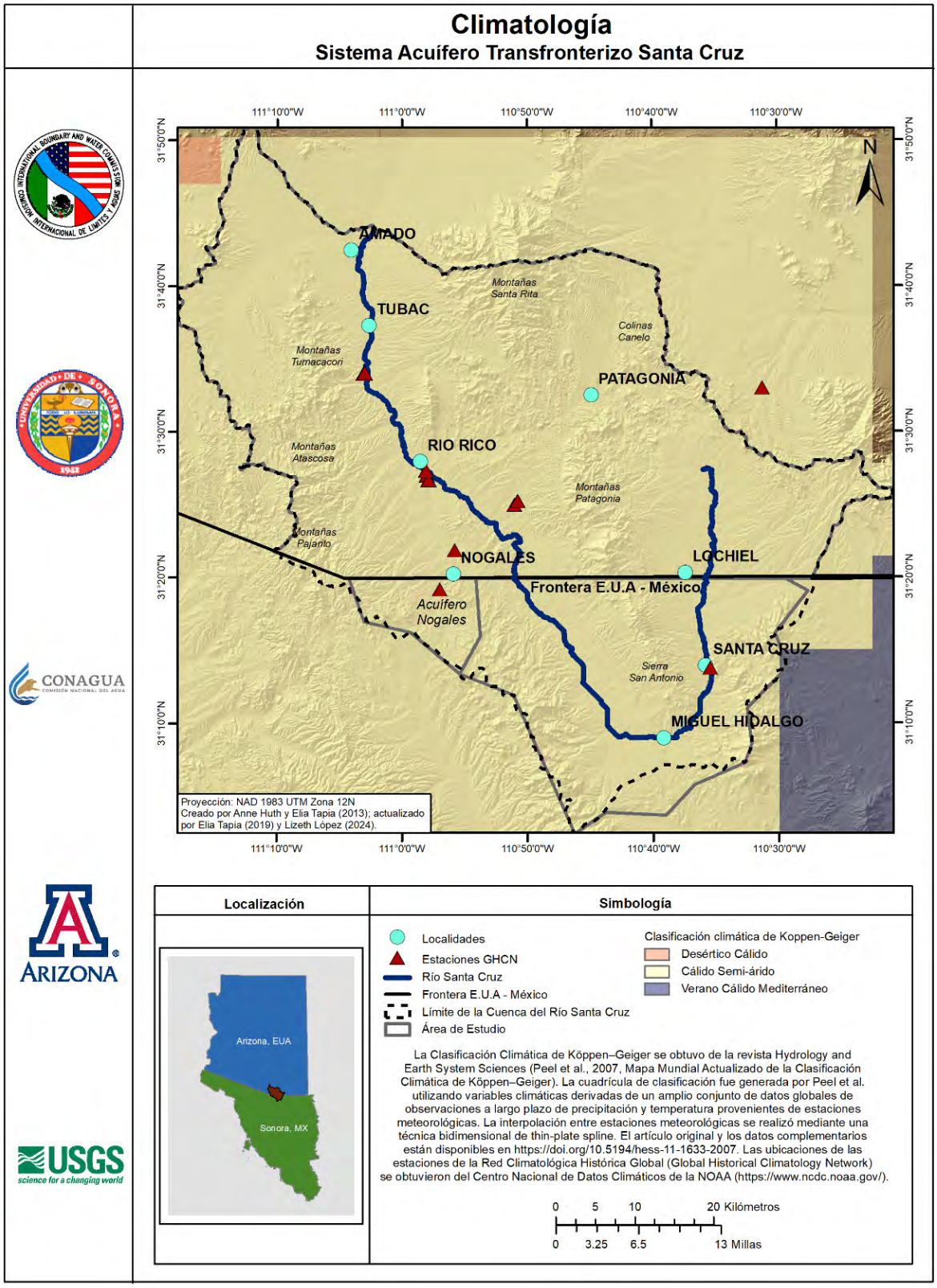


Figura 3.1 Clima y Estaciones Meteorológicas en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

Figura 3.2 Precipitación y temperatura media mensual para el período 1960-2022 en la estación de datos de NOAA NOGALES 6 N, número de estación USC00025924.

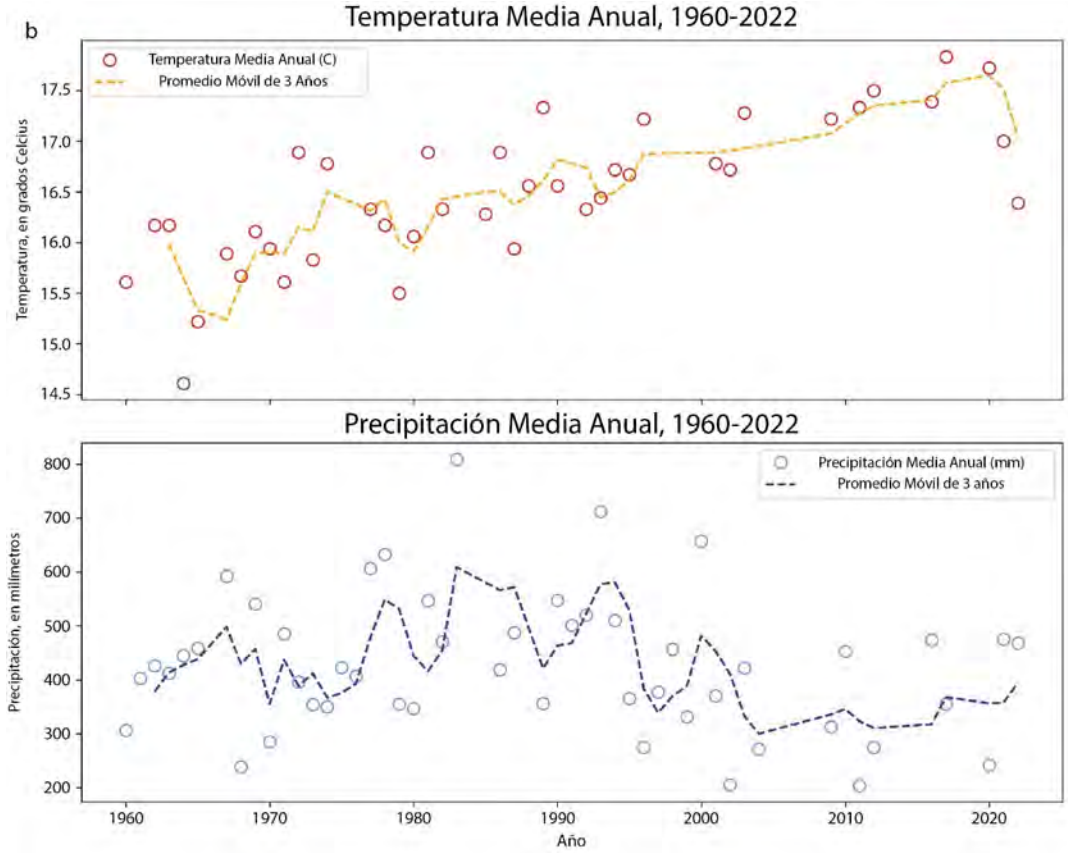


Figura 3.3 Precipitación y temperatura media anual para el período de 1960-2022 a 2017 en la estación de datos de NOAA NOGALES 6 N, número de estación USC00025924. Los datos fueron obtenidos del portal en línea de datos climáticos de NOAA (https://www.ncei.noaa.gov/cdo-web/).

Minjarez et al. (2011) presentó un análisis climatológico para el SCRAS (por sus siglas en inglés). En el estudio, el equipo utilizó dos estaciones meteorológicas en México y una en Estados Unidos para evaluar las variables climáticas en el área. Los datos se obtuvieron de CONAGUA y del Centro Regional del Clima del Oeste de los Estados Unidos. Según Minjarez et al., (2011), la precipitación en el SCRAS es variable, pero generalmente bimodal. Aproximadamente el 60% de la precipitación total se produce en los meses de verano (julio-agosto), coincidiendo con el monzón de América del Norte, y aproximadamente el 50% de la precipitación anual se produce durante la temporada de invierno (Shamir et al., 2021). Los mapas del TSCAS que muestran la precipitación media anual (Figura 3.7), la precipitación media mensual del mes de enero (Figura 3.8) y la media mensual de agosto (Figura 3.9) indican mayor precipitación en las montañas que son una importante fuente de recarga y escorrentía. La precipitación promedio anual varía entre 340 y 840 mm en el área de estudio, incluyendo el monzón de verano y nevadas significativas en invierno en las elevaciones altas. En enero la precipitación varía entre 22 y 72 mm, mientras que en agosto la precipitación varía entre 69 y 150 mm. Estos rangos están corroborados por los datos del modelo PRISM (PRISM Climate Group, 2022) para el período de 1995 a 2018 que se seleccionaron para una ubicación cerca de donde el Río Santa Cruz fluye hacia el norte a través de la frontera internacional (Figura 3.1). Se seleccionó el rango de fechas porque corresponde a la sequía reciente que comenzó alrededor de 1995 y es potencialmente continua. La mayor precipitación mensual y la temperatura generalmente ocurren en julio con una media de 108 mm y 26.4ºC (Figura 3.2). El mes de menor precipitación es mayo, estimado en alrededor de 3 mm.

Minjarez et al. (2011) calcularon la evapotranspiración real promedio anual (ET) para tres estaciones: Santa Cruz, Sonora (497 mm); Nogales, Sonora (427 mm); y Nogales, Arizona (472 mm). Estos equivalían a entre el 90% y el 95% de la precipitación. Tillman et al. (2011) utilizaron datos satelitales MODIS para calcular la ET derivada de acuíferos para el período 2000-2007 en la parte de Sierras y Valles (Basin and Range) de Arizona. La ET derivada de acuíferos es el agua extraída por las raíces de la vegetación ribereña y de humedales debajo del nivel freático. Para el AMA de Santa Cruz, los valores oscilaron entre 0.74 hm^3 (hectómetros cúbicos) y 1.85 hm^3. Para el Valle de San Rafael, los valores oscilaron entre 6 hm^3 y 12.6 hm^3.

Se han realizado varios estudios climáticos en el área de estudio. Hirschboeck (1985) investigó la relación entre el tipo de tormenta y la frecuencia de inundaciones en la cuenca del Río Gila, de la cual forma parte la cuenca del Río Santa Cruz, y encontró que los datos correspondientes a distintos tipos de sistemas meteorológicos generan magnitudes de inundación, hidrogramas y frecuencias diferentes de las calculadas a partir del conjunto completo de datos. Esta información podría utilizarse para orientar los modelos de flujo de agua superficial y subterránea, ya que estas características del flujo influirán en las entradas y salidas del modelo, como la recarga y la descarga. Siguiendo con esta investigación, Webb y Betancourt (1992) encontraron que las magnitudes de

las inundaciones en el Río Santa Cruz aumentaron entre 1960 y 1986 debido a la canalización y al cambio de uso del suelo. También encontraron que había una mayor probabilidad de ocurrencia conjunta de dos tipos de sistemas de tormentas (sistemas de baja presión y ciclones tropicales) durante ese período, lo que aumentaba la probabilidad de grandes inundaciones. Con respecto a los ciclos climáticos, Hanson et al. (2006) llevaron a cabo análisis espectrales y de componentes principales de los efectos del ciclo climático en los niveles de agua subterránea, caudales, precipitaciones y anillos de árboles en cuatro cuencas, incluida el área de estudio. Descubrieron que el 53% de la variabilidad en los datos podría explicarse por la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), seguida en un el 17% por El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés). El cambio climático a largo plazo puede afectar las precipitaciones y, por lo tanto, la disponibilidad de agua. Scott et al. (2012) utilizaron escenarios climáticos desarrollados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) para predecir los impactos del cambio climático y el crecimiento de la población en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz durante el siglo XXI. Descubrieron que las proyecciones de precipitación variaban sustancialmente según el escenario de emisiones. Scott et al. (2012) utilizaron tres escenarios específicos del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés): el escenario A2, que asume un alto crecimiento poblacional, un desarrollo económico orientado a nivel regional y un avance tecnológico más lento; el escenario B1, que considera un crecimiento poblacional más moderado y pone énfasis en la sostenibilidad global y la eficiencia ambiental; y el escenario A1B, un escenario equilibrado que contempla un rápido crecimiento económico y desarrollo tecnológico, con una combinación de fuentes de energías fósiles y renovables. Sin embargo, todos los escenarios estaban de acuerdo en que las temperaturas aumentarían, lo que incrementaría la pérdida de agua del sistema por evapotranspiración. Sus resultados difieren de los de un informe del Bureau of Reclamation de EE. UU. que predijo que no había cambios en la frecuencia de veranos o inviernos húmedos (Gangopadhyay y Pruitt, 2011). En 2015, Shamir et al. utilizaron los resultados de modelos climáticos globales re-escalados dinámicamente para investigar el impacto potencial del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca superior de Santa Cruz, que definieron como el área de estudio entre la frontera entre EE. UU. y México y el límite norte del SCAMA. Sus resultados predicen un aumento en la frecuencia de veranos secos y una disminución en los eventos de precipitación invernal no extrema.

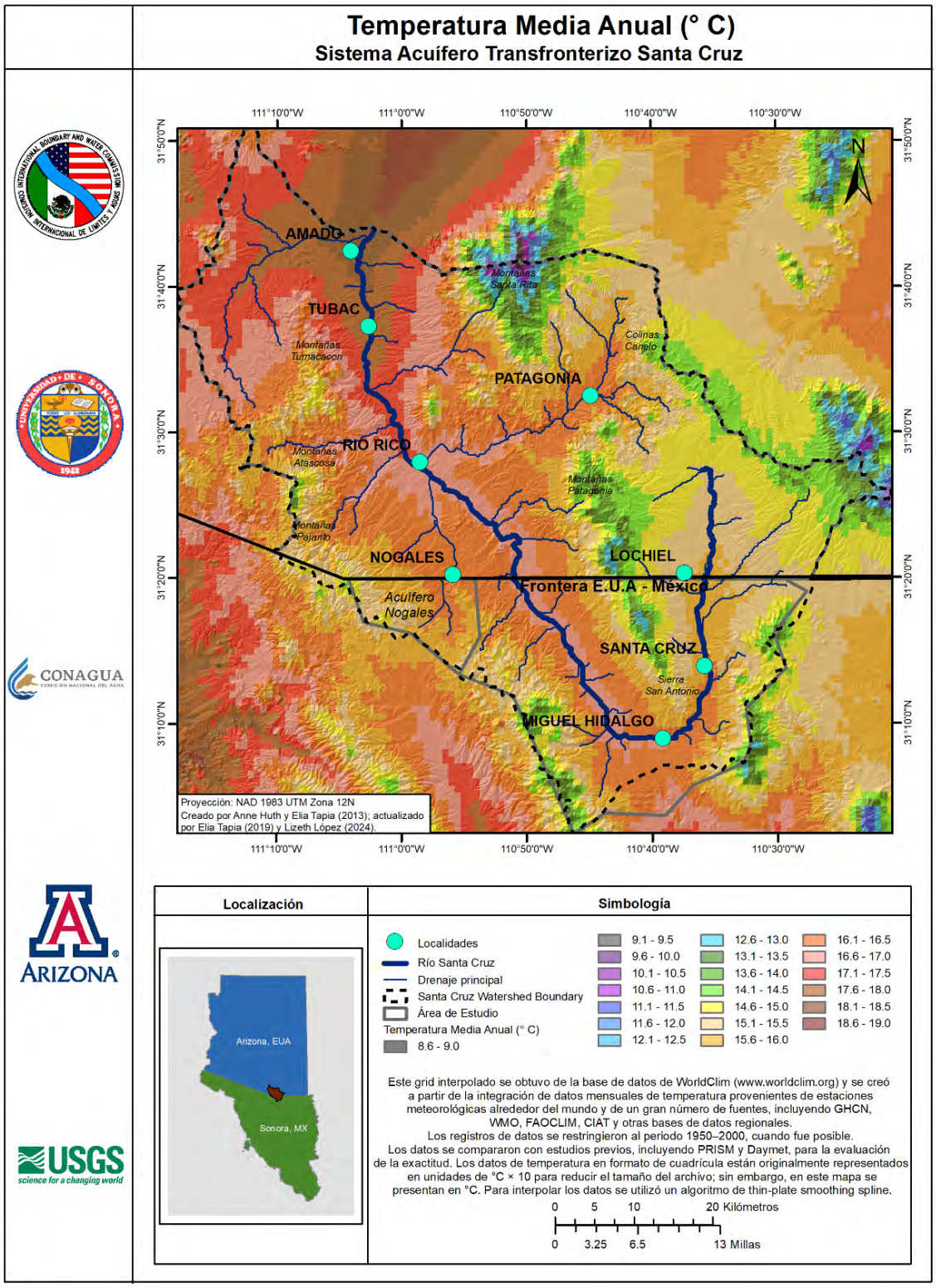


Figura 3.4 Temperatura Promedio Anual en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

Para la explicación de las abreviaturas, véase la lista de Términos Técnicos Clave incluida al inicio del Capítulo 1.

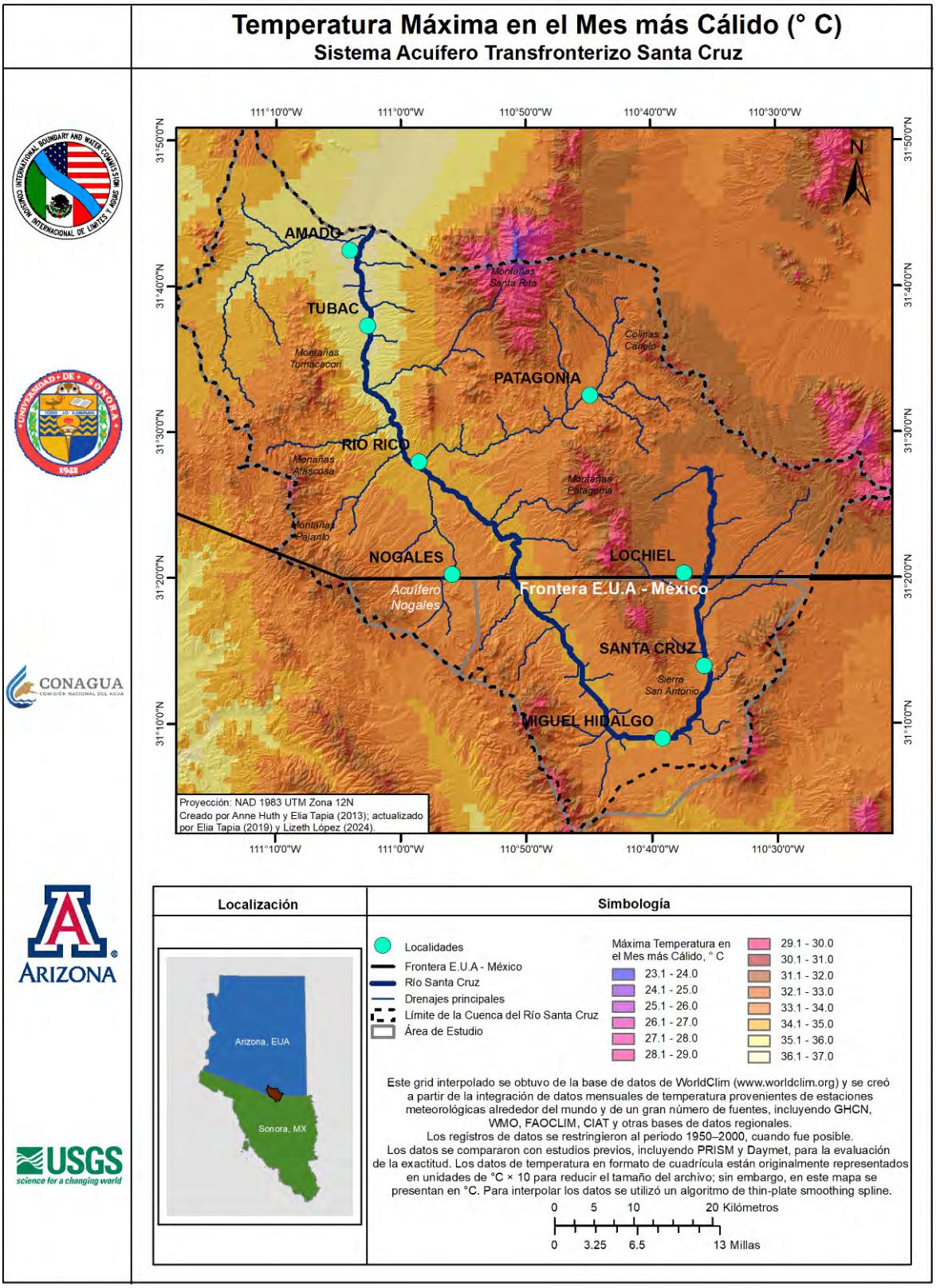


Figura 3.5 Temperatura Máxima en el Mes más Cálido en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

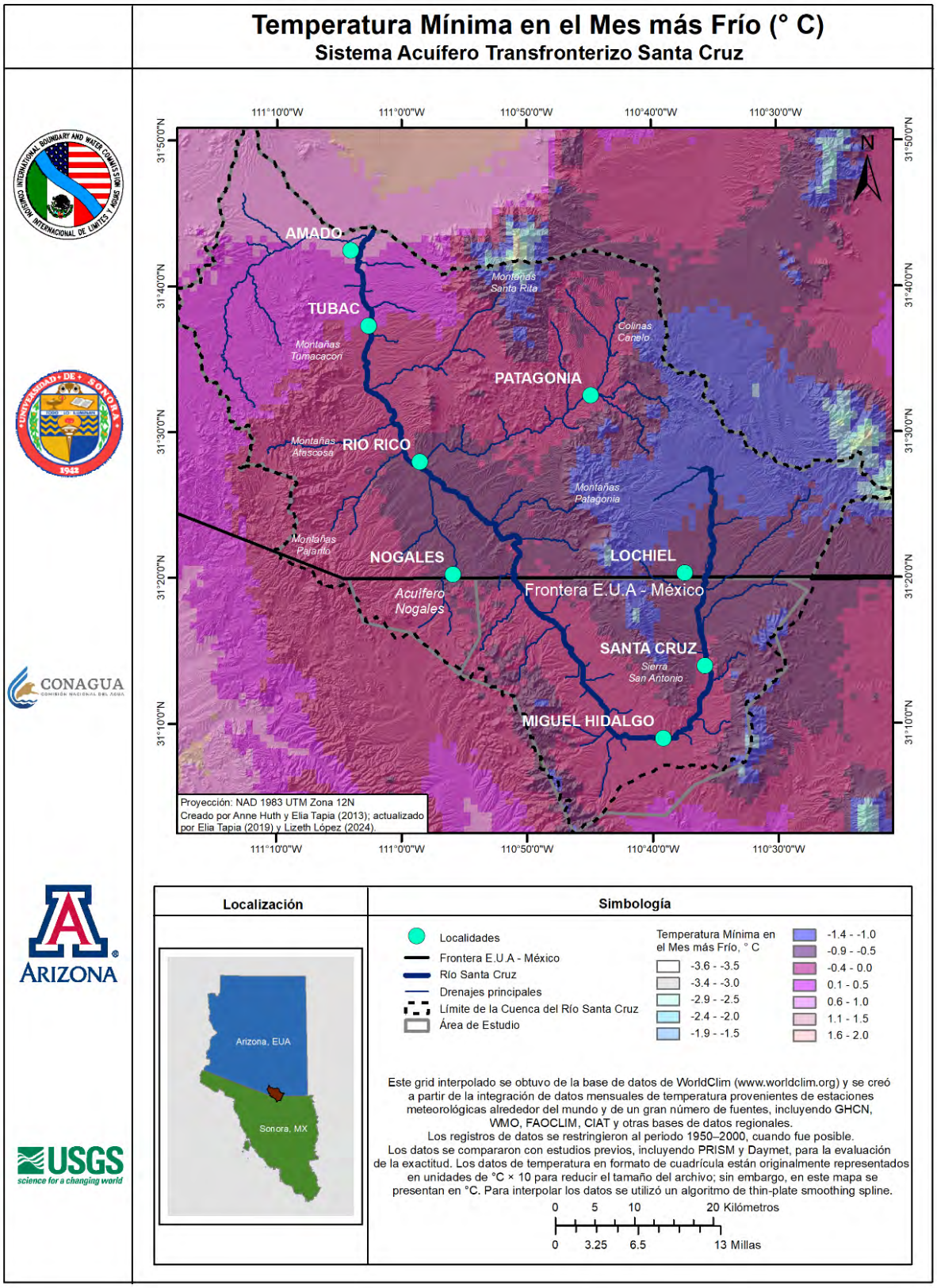


Figura 3.6 Temperatura Mínima en el Mes más Frío en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

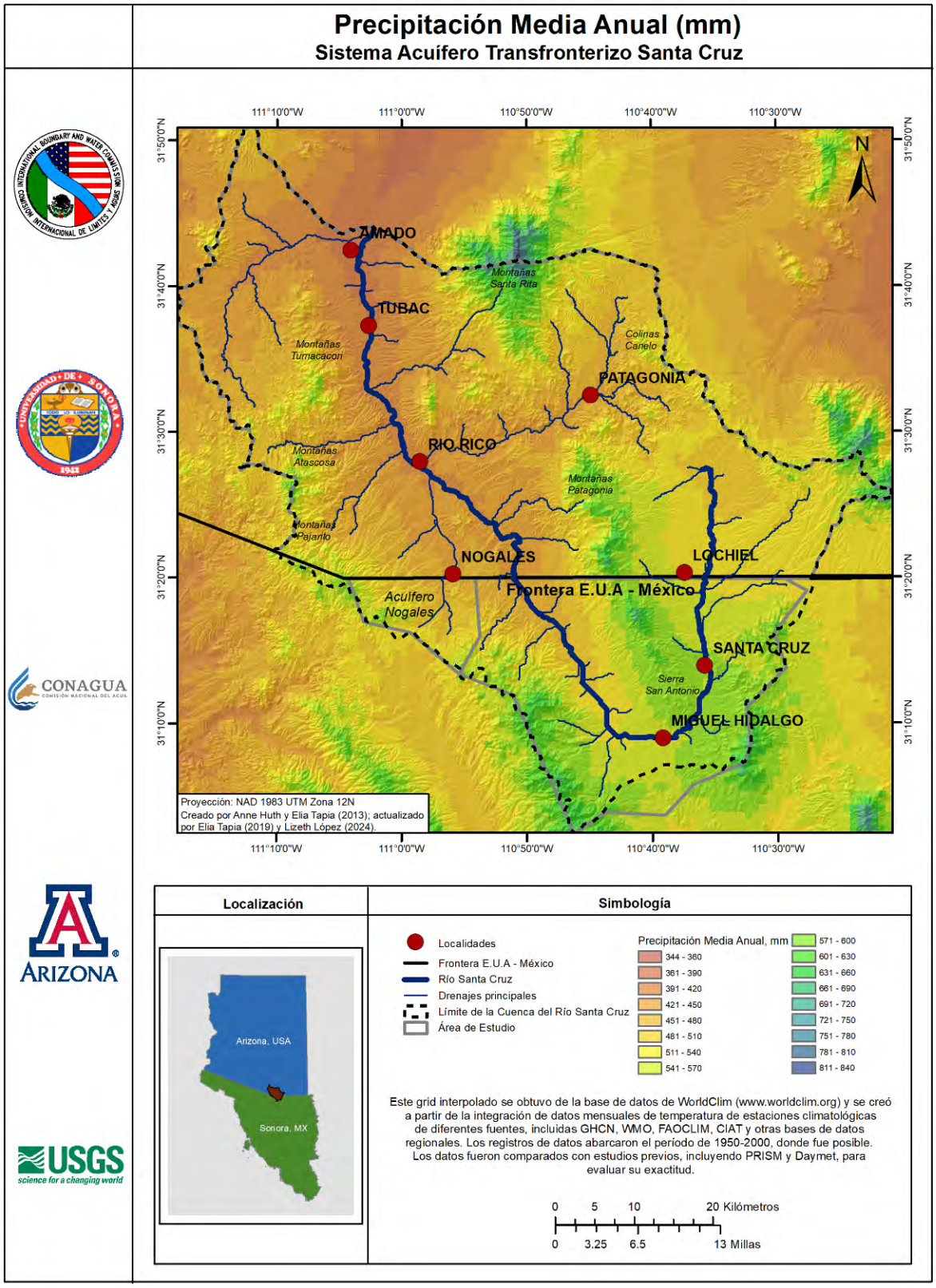


Figura 3.7 Precipitación Promedio Anual en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

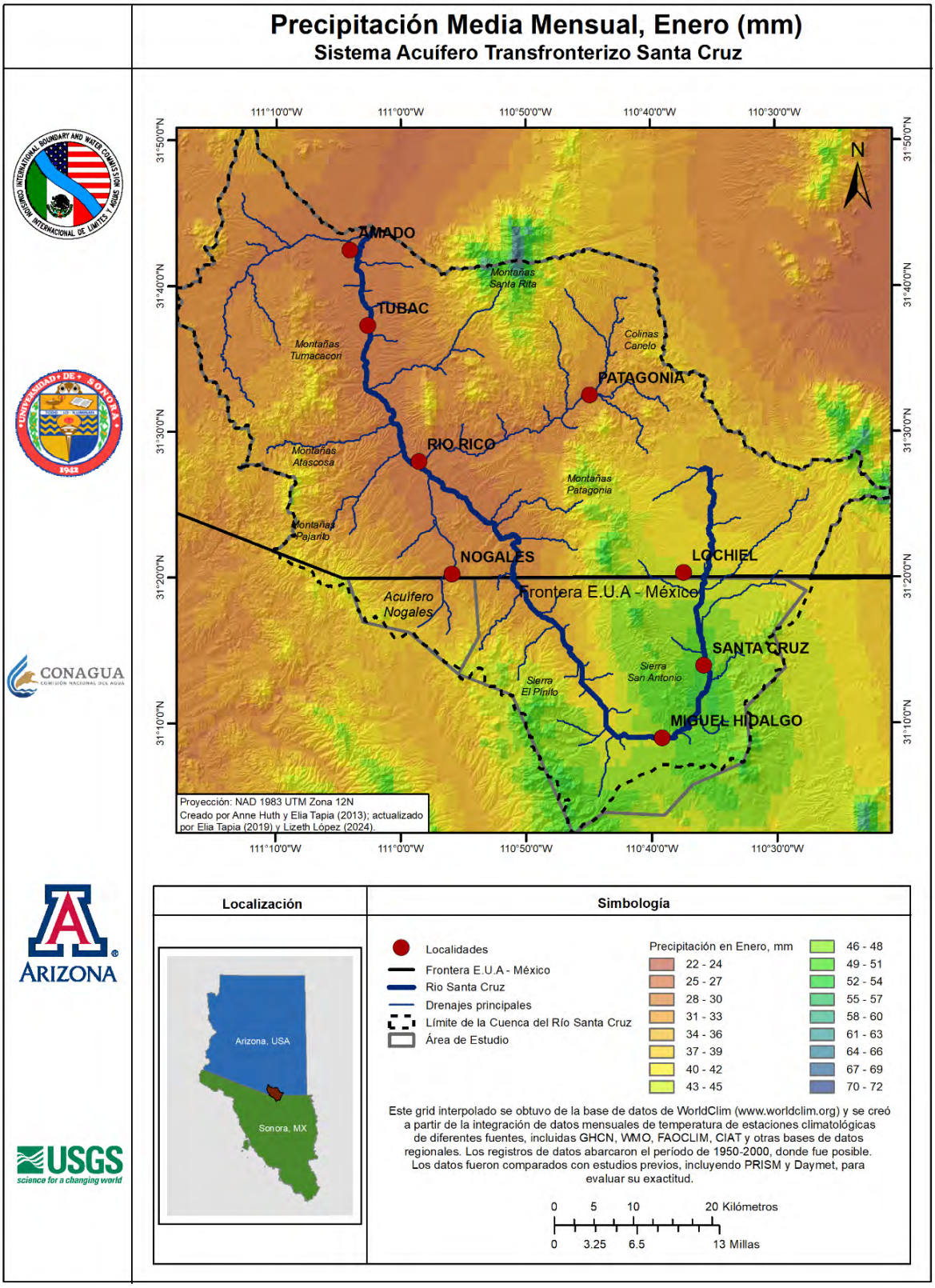


Figura 3.8 Precipitación Promedio Mensual en el Mes de Enero en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

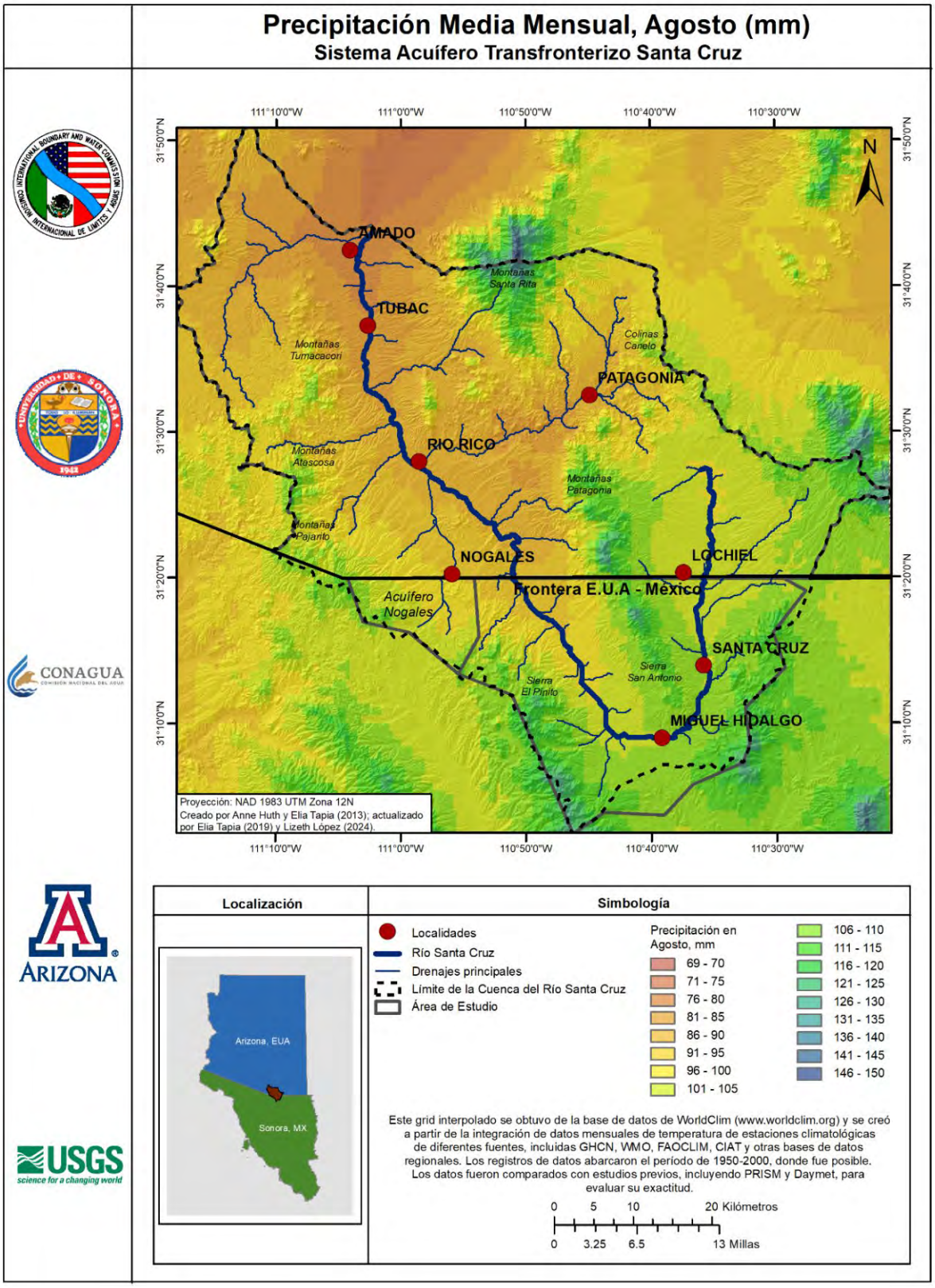


Figura 3.9 Precipitación Promedio Mensual en el Mes de Agosto en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

3.3. Sistema Hidrológico Superficial

El área de estudio en México se encuentra dentro de la Región Hidrológica RH7, Río Colorado (CONAGUA, 2015). Sin embargo, debido a la forma en que se trazan los límites legales en México, el SCRAS se divide entre dos jurisdicciones adyacentes: la Subcuenca del Río Santa Cruz, que comprende el 93% del área total del acuífero, y la Subcuenca Arroyo Cocóspera, que comprende el 7% restante (Figura 3.10; Minjarez et al., 2011). El Acuífero Nogales tiene una superficie de alrededor de 120 km^2 (GAS-CONAGUA, 2024). La mayor parte de su cuenca se encuentra en Sonora. El área de drenaje del Río Santa Cruz, aguas arriba del aforo de Nogales, Arizona (USGS Site ID: 09480500), es de 1,400 km^2, de los cuales aproximadamente 1,150 km^2 se encuentran en Sonora (Shamir et al., 2015).

El Río Santa Cruz se origina en los EE. UU. en el Valle de San Rafael y fluye hacia el sur hacia México. Cruza la frontera internacional cerca del pueblo de Lochiel, Arizona. En Sonora, el río cambia de dirección aproximadamente 20 km al sur de la frontera internacional y comienza a dirigirse hacia el oeste al norte del pueblo de Miguel Hidalgo (San Lázaro), continuando por unos 7 km (Robert, 2006). Luego, el río gira hacia el noroeste, continuando 27 km hasta cruzar el límite internacional al este de Nogales. El cauce del río continúa hacia el norte atravesando los asentamientos de Río Rico, Tumacácori, Tubac y Amado, Arizona, cerca del límite del área de estudio. Al norte del área de estudio, el caudal es mayormente intermitente a medida que el cauce atraviesa el área de Tucson y continúa hacia el norte en dirección al Río Gila, al sur de Phoenix, Arizona.

Dentro del área de estudio en Sonora, los afluentes más importantes del Río Santa Cruz son los arroyos La Zorrilla, Las Pilas, El Pilar, Los Jacalones, Las Abispas, El Bombín, La Capilla, San Luis y La Calera (Minjarez et al., 2011) (Figura 3.10). En Arizona, hay cuatro afluentes principales del Río Santa Cruz. Al sur se encuentra el Arroyo Nogales, que se origina en Nogales, Sonora y se une a Santa Cruz junto a la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales (PITAR). Los principales afluentes en el lado oeste del Arroyo Nogales en Sonora son los arroyos Chimeneas (Tecnológico) y Cementerio (Internacional). Los tres afluentes restantes que se unen al Río Santa Cruz en Arizona son el arroyo Sonoita, que pasa por la ciudad de Patagonia y tiene su confluencia con el río cerca de Rio Rico, Arizona, Josephine Canyon, que drena la parte suroeste de las Montañas Santa Rita, y el arroyo Sopori, ubicado en la esquina noroeste del área de estudio.

Los arroyos dentro del área de estudio se dividen en tres categorías: perennes, intermitentes o efímeros. Los arroyos perennes son aquellos con flujo continuo. Los arroyos intermitentes fluyen parte del año, generalmente en respuesta a fuentes estacionalmente variables, como el derretimiento de la nieve, manantiales o niveles freáticos fluctuantes (Meinzer, 1923). Cuando un tramo temporalmente intermitente conecta dos tramos perennes, la corriente se interrumpe espacialmente cuando cesa el flujo estacional. Los arroyos efímeros fluyen solo en respuesta a la precipitación y están desconectados del

nivel freático. En el área de estudio, los arroyos y tramos efímeros son más numerosos y tienen una longitud total mayor que los arroyos perennes. Si bien esto es típico a nivel mundial, lo es más en ambientes áridos (Acuña et al., 2014; Levick et al., 2008). Con respecto a la distribución espacial del flujo, todos los arroyos en el área de estudio presentan normalmente una interrupción espacial (tramos discontinuos) durante una parte del año.

De los principales sistemas de drenaje, el Río Santa Cruz, el arroyo Sonoita y arroyo Nogales tienen tramos perennes, aunque el tramo principal del Río Santa Cruz es discontinuo durante la mayor parte del año, excepto durante grandes inundaciones (Niraula et al., 2012). El tramo del Río Santa Cruz entre Río Rico y Tubac, Arizona, está dominado por la descarga de la PITAR. El efluente de esta planta proviene de aguas residuales recolectadas en ambos lados de la frontera, aunque el aporte de aguas residuales de México representa la mayor parte de lo que se trata en la PITAR. El efluente ayuda a mantener los flujos superficiales y los servicios ecosistémicos asociados, como la vegetación y el hábitat de la vida silvestre, además de recargar los recursos de aguas subterráneas para el suministro aguas abajo de la planta de tratamiento (Norman et al., 2013). Alrededor de una cuarta parte de las aguas residuales recolectadas en Nogales, Sonora, se transporta a la cuenca del Río Los Alisos, ubicada al sur del acuífero Nogales fuera del área de estudio, donde se trata antes de ser descargada al Río Los Alisos (Tapia-Villaseñor et al., 2020).

Actualmente, existen cuatro estaciones hidrométricas en operación dentro del área de estudio. La estación más aguas arriba es Río Santa Cruz cerca de Lochiel (ID del sitio USGS: 09480000). Está ubicada en el Valle de San Rafael a unos 2.5 km al norte de la frontera entre EE. UU. y México; operó inicialmente entre 1949 y 2013 y se reinició en 2019. El caudal diario promedio para el período 10/1995 - 9/30/2020 fue de 0.058 m^3/s, y la mediana fue de 0.0093 m^3/s (USGS, 2021). Los datos más antiguos de esta estación hidrométrica muestran un periodo de caudales comparativamente más bajos entre 1950 y mediados de la década de 1960, y un periodo de caudales más altos desde principios de la década de 1980 hasta mediados de la década de 1990 (Figura 3.11). El patrón observado en 2020 fue similar al de otros años con escaso flujo en verano y flujo invernal reducido, como ocurrió en 2002–2003. La siguiente estación hidrométrica aguas abajo se localiza en el Río Santa Cruz cerca de Nogales, Arizona (Santa Cruz River near Nogales, Arizona; sitio USGS número 09480500), aproximadamente a 1.3 km aguas abajo (al norte) de la frontera internacional, y ha operado de manera continua desde octubre de 1985. El caudal medio diario para el periodo del 1 de octubre de 1995 al 30 de septiembre de 2020 fue de 0.21 m^3/s, y la mediana fue de 0 m^3/s (USGS, 2021). En esta estación hidrométrica, el régimen de caudal comenzó a cambiar alrededor de 1996, ya que el flujo invernal se volvió notablemente menos frecuente que en la porción más reciente del registro (2014–2020) (Figura 3.11). Esto coincide con la sequía regional de largo plazo, que se ha prolongado hasta 2024 (Arizona State Climate Office, 2025). Se recopilaron varios años de datos a principios de la década de 1930 en la estación hidrométrica de Nogales Wash at Nogales, Arizona (sitio USGS número 09481000;

Figura 3.12). Esta estación fue reactivada en 2010. El caudal medio diario para el periodo de operación del 23 de abril de 2010 al 30 de septiembre de 2020 fue de 0.27 m^3/s, y la mediana fue de 0.10 m^3/s (USGS, 2021). El registro del caudal de principios de la década de 1930 muestra un flujo bajo o nulo, excepto en el verano. Es posible que esto refleje una población, un área impermeable y una actividad industrial más pequeña que en la actualidad, pero el registro es demasiado breve para respaldar conclusiones firmes. El Arroyo Nogales está revestido de concreto en gran parte de su longitud y experimenta pocos días sin flujo, a diferencia de los otros medidores en el área de estudio. No hay tendencias aparentes en el registro del medidor reactivado a partir de 2010, aunque se pueden observar ciclos anuales que incluyen flujos más altos durante los meses del monzón de julio, agosto y septiembre (Figura 3.13). En la estación Río Santa Cruz en Tubac, Arizona (ID del sitio USGS: 09481740), la descarga media diaria para el período del 1/10/1995 - 9/30/2020 fue de 0.70 m^3/s, y la mediana fue de 0.33 m^3/s (USGS, 2021). Con excepción de 2019 y 2020, el registro en esta estación muestra una clara disminución en el flujo a partir de 2010, con disminuciones más notables en el verano (Figura 3.14). La disminución coincidió con la apertura de la PITAR mejorada y respalda la hipótesis de Treese y Meixner (2009) que implicaba una mayor permeabilidad en el lecho del río. Teorizaron que la disminución de nutrientes en el efluente de la PITAR provocó la desintegración de una capa de algas impermeable, que se extendía varios kilómetros río abajo, lo que resultó en una mayor infiltración en el lecho. Además, en 2013, el río dejó de fluir en Tumacácori durante un período sin precedentes de casi cuatro meses (Sonoran Institute, 2016; US Geological Survey, 2021). La Tabla 3.1 y la Tabla 3.2 incluyen información sobre la descarga del Río Santa Cruz en la porción mexicana del TSCAS. La información fue recolectada por CILA durante los años 1962-1974 por medio de aforos del Arroyo El Cajón, ubicado a 7 km al suroeste de Santa Cruz, Sonora y 50 km al sureste de Nogales, Sonora. El caudal medio del Río Santa Cruz para el período analizado es de 0.31 m^3/s y el volumen medio de agua superficial es de 564,000 m^3 (Boletines CILA, 1962-1974).

Se han llevado a cabo varios estudios del sistema hidrológico superficial además de los mencionados en la sección de climatología de este capítulo. El USGS rastreó los contaminantes orgánicos e inorgánicos y sus efectos desde las fuentes de origen hasta los sitios de depósito en sedimentos, agua, plantas y animales utilizando un enfoque interdisciplinario e integrador (Norman et al., 2010a). El flujo base del Arroyo Nogales se incrementa por aportaciones de agua subterránea somera, así como por las fugas de infraestructura de agua potable y aguas residuales en Nogales, Sonora, situación exacerbada por el aumento de la población y las rutas de transporte que invaden las llanuras aluviales y los drenajes (Norman et al., 2010b). La CILA investigó la regulación del escurrimiento mediante una serie de obras de retención en Nogales, Sonora, con el propósito de aumentar su eficacia al optimizar la ubicación de futuras obras (Norman et al., 2010c). Este estudio aportó información sobre los beneficios potenciales

de la ubicación estratégica y el diseño de estructuras de retención, destacando su papel en la mitigación del riesgo de inundación bajo distintos escenarios de urbanización.

Norman et al. (2013) brinda un marco para comprender el valor de los efluentes binacionales, analizaron cómo se desarrollaron las estimaciones y resumieron los servicios ecosistémicos proporcionados por el flujo de efluente de la PITAR. Un análisis de escenarios de descargas decrecientes de la planta de tratamiento binacional demuestra que, en el caso más extremo, el agua visible disminuye en un área importante para las aves entre 2.5 y 7.5 meses al año. Esto da como resultado una pérdida de bosques ribereños y tierras arboladas, hábitat de muchas especies, y revierte la zona ribereña a las condiciones previas a la planta de tratamiento. Norman et al., (2013) relacionaron las pérdidas de hábitat y vegetación con las pérdidas en el valor de la propiedad cuando las casas ya no están ubicadas junto a un río perenne e identificaron los vecindarios socioambientalmente vulnerables que podrían verse afectados por estas pérdidas.

En la porción mexicana del TSCAS, los datos hidrométricos de la estación El Cajón son limitados, con solo 14 años de observaciones entre 1962 y 1976 (Tabla 3.1 y Tabla 3.2). Tapia-Villaseñor et al. (2022) desarrolló un modelo de balance hídrico para cuantificar los flujos de agua que entran y salen del acuífero. Este modelo incorpora un componente hidrológico que utiliza datos de precipitación y evapotranspiración para simular el caudal en ríos, la recarga natural, la humedad del suelo y la evapotranspiración real.

Tapia-Villaseñor et al. (2020), en el estudio Impacts of Variable Climate and Effluent Flows on the Transboundary Santa Cruz Aquifer, examinó la influencia de las descargas de aguas residuales aguas abajo de la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales (PITAR), y proporcionó información detallada sobre la transferencia de aguas residuales de México a Estados Unidos. Este estudio resalta la importancia de los flujos transfronterizos de aguas residuales y sus implicaciones para la calidad y disponibilidad del agua en la región.

Por su parte, Norman (2007) se centró en la evaluación de la contaminación difusa en la región fronteriza de Ambos Nogales, que incluye Nogales, Arizona, y Nogales, Sonora. Esta investigación abordó problemáticas críticas de calidad del agua relacionadas con escorrentías urbanas y agrícolas en el contexto de una cuenca transfronteriza. El estudio destaca que la rápida urbanización en Nogales, Sonora, es un factor clave que agrava los problemas de contaminación debido a una infraestructura inadecuada, como los sistemas de aguas residuales con fugas y la falta de control del agua pluvial.

Tabla 3.1 Descarga Media Mensual (m^3/s) en el Río Santa Cruz en México. Aforo del Arroyo El Cajón: 1962-1976.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
1962	3.17	0.29	0.29	0.17	0.11	0.15	1.90	2.82	0.22	2.68	0.11	0.11
1963	0.10	0.10	0.13	0.01	0.10	0.05	0.48	1.26			0.19	0.21
1964	0.11	0.11	0.23	0.25	0.24	0.13	0.53					
1965				0.12	0.23	0.23	0.36	0.36	0.34	0.08	0.06	0.38
1966	0.57	0.81	0.40	0.10	0.07	0.07	0.35	1.94	0.76	0.54	0.40	0.33
1967	0.26	0.22	0.24	0.14	0.07	0.14	0.11	0.17	0.14	0.16	0.13	
1968			0.41	0.17	0.10	0.06	0.14	0.28	0.10			
1969	0.02	0.02	0.02		0.01		0.13	0.16	0.04	0.03	0.03	0.03
1970	0.34	0.34	0.33	0.34	0.03	0.03	0.07	0.89	0.40	0.18	0.15	0.16
1971		0.04	0.03	0.04			0.15	1.36	0.52	0.25	0.14	
1972							0.20	0.22	0.29	0.12	0.18	
1973	0.12	0.21	0.45	0.17	0.06	0.12	0.21	0.14	0.05	0.05	0.07	0.05
1974	0.06	0.06	0.07	0.05	0.05	0.10						

Tabla 3.2 Volumen Medio Mensual (miles de m3) en el Río Santa Cruz en México. Aforo del Arroyo El Cajón: 1962-1976.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
1962	35	28	23	12	4	-	841	1,463	241	76	34	33
1963	258	252	343	289	272	122	1,284	3,382			499	555
1964	283	279	613	651	631	343	1,432					
1965				321	622	600	966	958	894	214	165	1,025
1966	1,522	1,971	1,097	250	194	190	931	5,207	1,958	1,437	1,034	889
1967	702	537	639	376	194	352	303	460	359	431	344	
1968			1,092	442	269	149	381	740	245			
1969	47	48	45	8	28	9	337	428	110	90	90	69
1970	911	834	886	880	69	86	183	2,386	1,043	486	379	439
1971		99	92	94			389	3,652	1,346	664	373	
1972							538	598	746	335	465	438
1973	331	510	1,206	429	156	305	559	389	124	127	187	135
1974	168	144	178	128	134	254						

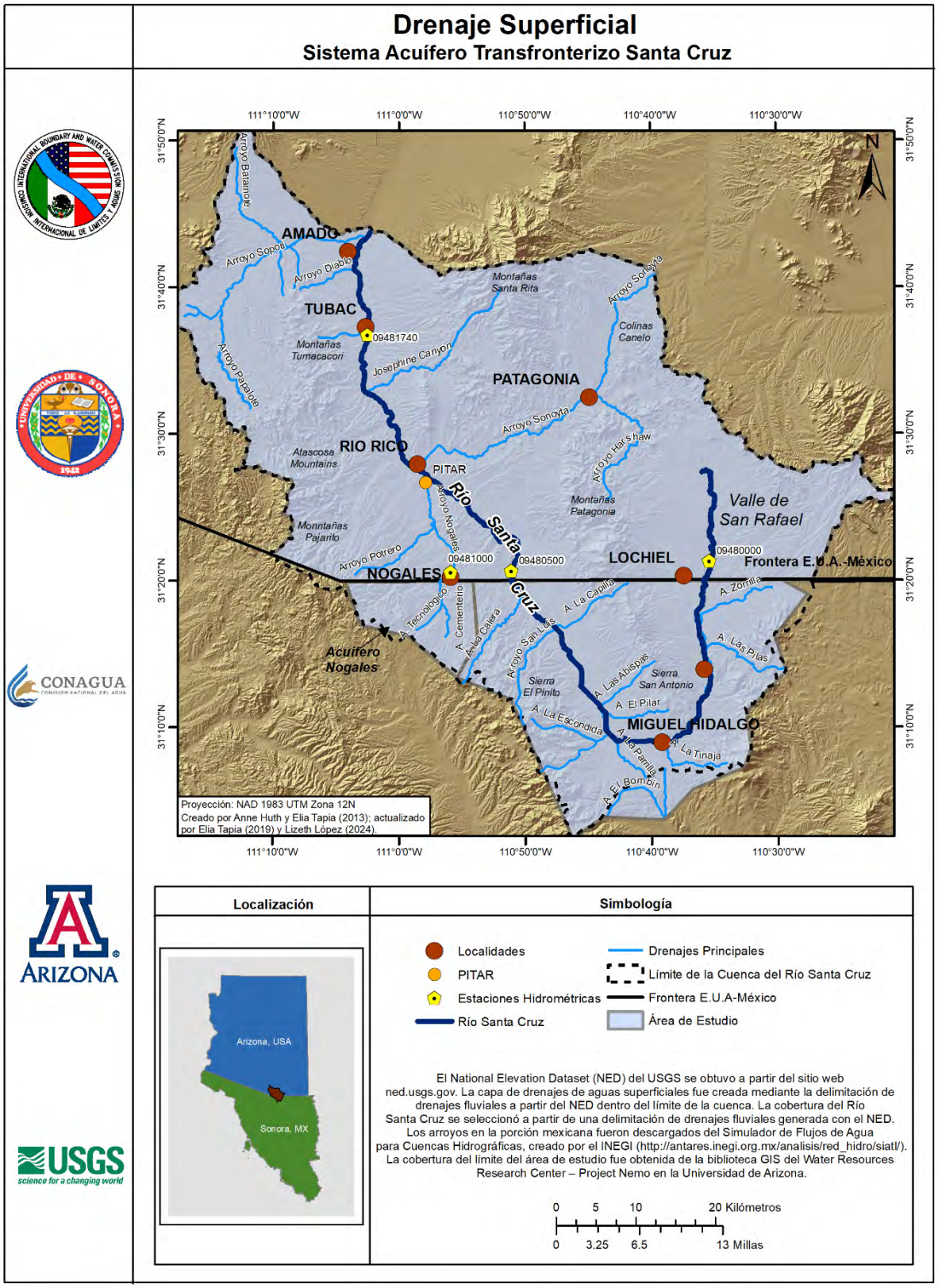


Figura 3.10 Red de Drenaje de Aguas Superficiales en el Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz.

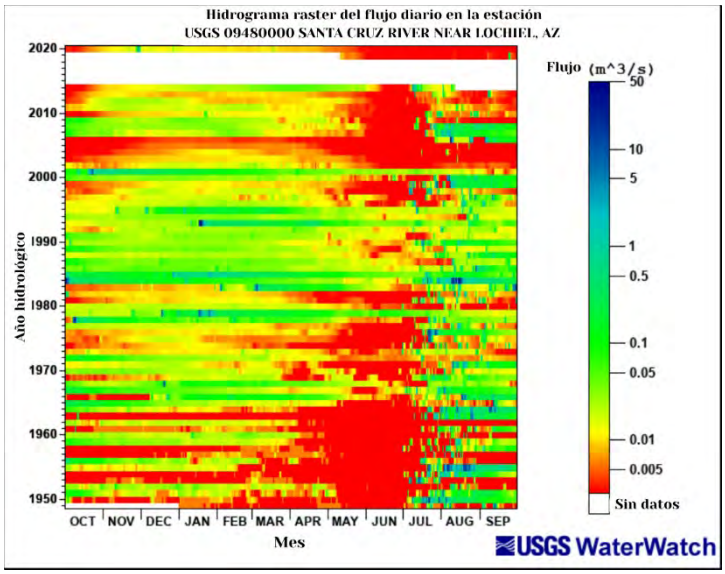


Figura 3.11 Hidrograma ráster del caudal diario en el Río Santa Cruz en Lochiel, AZ hasta el final del año calendario 2020.

Un año hidrológico es el periodo de 12 meses que va del 1 de octubre de un año determinado al 30 de septiembre del año siguiente. Un año hidrológico se designa por el año calendario en el que finaliza. Cada píxel representa el caudal medio de cada día en el que se midió el caudal. El registro de la magnitud del flujo está codificado por colores de acuerdo con la barra de escala a la derecha de la figura, donde el rojo indica flujo bajo o nulo y el azul indica los flujos más altos en unidades de metros cúbicos por segundo (Tenga en cuenta que las escalas de los hidrogramas ráster en cada figura pueden diferir.)

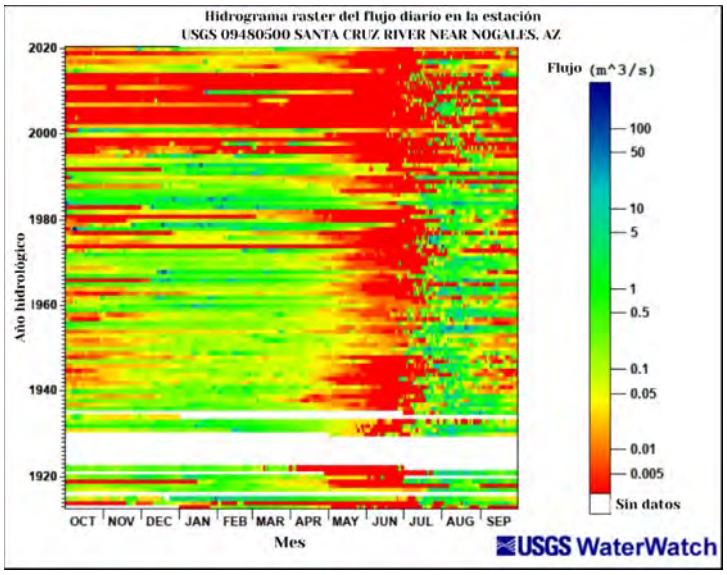


Figura 3.12 Hidrograma ráster del caudal diario en el Río Santa Cruz cerca de Nogales AZ hasta el final del año calendario 2020.

Cada píxel representa el caudal medio de cada día en el que se midió el caudal. El registro de la magnitud del flujo está codificado por colores de acuerdo con la barra de escala a la derecha de la figura, donde el rojo indica flujo bajo o nulo y el azul indica los flujos más altos en unidades de metros cúbicos por segundo (Tenga en cuenta que las escalas de los hidrogramas ráster en cada figura pueden diferir.)

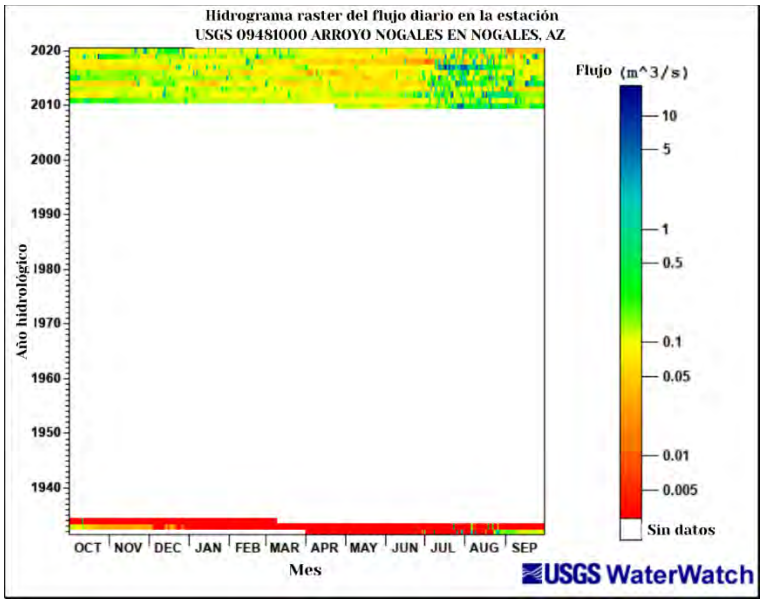


Figura 3.13 Hidrograma ráster del caudal diario en Arroyo Nogales en Nogales AZ hasta el final del año calendario 2020.

Cada píxel representa el caudal medio de cada día en el que se midió el caudal. El registro de la magnitud del flujo está codificado por colores de acuerdo con la barra de escala a la derecha de la figura, con el rojo que indica flujo bajo o nulo y el azul que indica los flujos más altos en unidades de metros cúbicos por segundo. (Tenga en cuenta que las escalas de los hidrogramas ráster en cada figura pueden diferir).

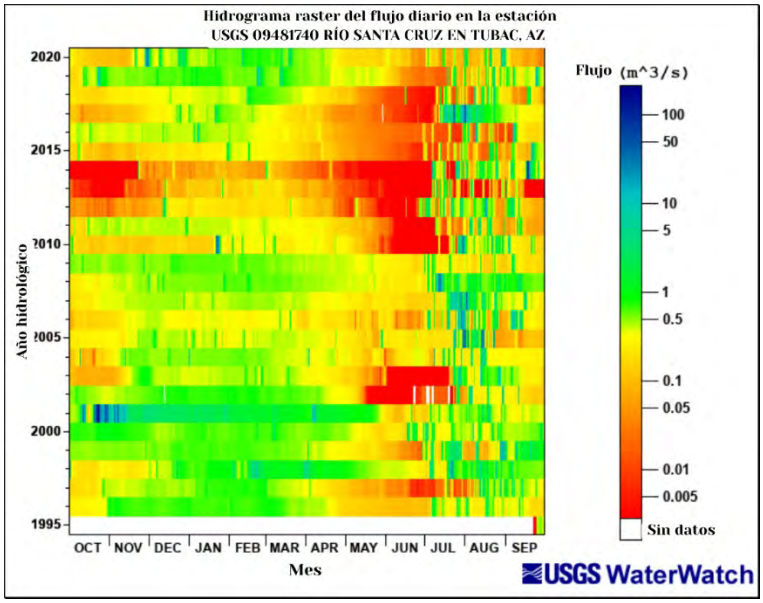


Figura 3.14 Hidrograma ráster del caudal diario en el Río Santa Cruz en Tubac AZ hasta el final del año calendario 2020.

Cada píxel representa el caudal medio de cada día en el que se midió el caudal. El registro de la magnitud del flujo está codificado por colores de acuerdo con la barra de escala a la derecha de la figura, con el rojo que indica flujo bajo o nulo y el azul que indica los flujos más altos en unidades de metros cúbicos por segundo. (Tenga en cuenta que las escalas de los hidrogramas ráster en cada figura pueden diferir).

Bibliografía

Acuña, V., Datry, T., Marshall, J., Barceló, D., Dahm, C. N., Ginebreda, A., McGregor, G., Tockner, K., Palmer, M.A., 2014. Why should we care about temporary waterways? Science 343, 1080–1081. doi: 10.1126/science.1246666

Arizona State Climate Office, 2024. Climate of Arizona.Cosultado el 1/6/2025, en https://globalfutures.asu.edu/azclimate/climate/

Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA). Boletín Hidrométrico No. 3 a No. 15 (1962-1974). Escurrimientos del Río Colorado y de otros ríos internacionales del oeste.

Comisión Nacional del Agua, Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015, Conservación del Recurso Agua, Distrito Federal, Mexico, March 27, 2015

Gangopadhyay, S., and Pruitt, T., 2011. West-wide climate risk assessments: Bias-corrected and spatially downscaled surface water projections. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Tech. Memo. 86-68210-2011-01, 138 pp.

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Nogales (2650), estado de Sonora. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2650.pdf

Hanson, R.T., Dettinger, M.D., and Newhouse, M.W., 2006, Relations between climate variability and hydrologic time series from four alluvial basins across the southwestern United States: Hydrogeology Journal, Vol. 14, No. 7, pp. 1122-1146

Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. Very High Resolution Interpolated Climate Surfaces for Global Land Areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.

Hirschboeck, K.K., 1985. Hydroclimatology of flow events in the Gila River Basin, central and southern Arizona: Tucson, University of Arizona, doctoral dissertation, 335 p.

Levick, L., J. Fonseca, D. Goodrich, M. Hernandez, D. Semmens, J. Stromberg, R. Leidy, M. Scianni, D. P. Guertin, M. Tluczek, and W. Kepner, 2008, The Ecological and Hydrological Significance of Ephemeral and Intermittent Streams in the Arid and Semi-arid American Southwest. U.S. Environmental Protection Agency and USDA/ARS Southwest Watershed Research Center, EPA/600/R-08/134, ARS/233046, 116 pp.

Meinzer, O., 1923. The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 489.

Minjarez Sosa, I., Monreal Saavedra, R., Grijalva Noriega, F.J., Ochoa Granillo, J.A., Tapia Villaseñor, E.M., Rangel Medina, M., Montijo González, A., 2011. Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Río Santa Cruz, Estado de Sonora, Primera Etapa. Hermosillo, Sonora.

Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Niraula, R., Norman, L.M., Meixner, T., Callegary, J.B., 2012. Multi-gauge Calibration for modeling the Semi-Arid Santa Cruz watershed in Arizona-Mexico border area using SWAT. Air, Soil Water Res. 5, 41–57. https://doi.org/10.4137/ASWR.S9410

Norman, L. M., Villarreal, M., Niraula, R., Meixner, T., Frisvold, G., Labiosa, W., 2013. Framing Scenarios of Binational Water Policy with a Tool to Visualize, Quantify and Valuate Changes in Ecosystem Services. Water, 5(3), 852–874. https://doi.org/10.3390/w5030852

Norman, L.M., 2007, United States-Mexican Border Watershed Assessment: Modeling Nonpoint Source Pollution in Ambos Nogales. Journal of Borderlands Studies 22 (1): 79–97. doi:10.1080/08865655.2007.9695670.

Norman, L.M., Callegary, J.B., van Riper, C., Gray, F., 2010a. The Border Environmental Health Initiative; Investigating the Transboundary Santa Cruz Watershed. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2010-3097: 2.

Norman, L.M., Levick, L.R., Guertin, D.P., Callegary, J.B., Quintanar Guadarrama, J., Gil Anaya, C.Z., Prichard, A., Gray, F., Castellanos, E., Tepezano, E., Huth, H., Vandervoet, P., Rodriguez, S., Nunez, J., Atwood, D., Olivero Granillo, G.P., Gastellum Ceballos, F.O.,2010c. "Nogales Flood Detention Study." U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1262: 112.

Norman, L.M., Villarreal, M.L., Wallace, C.S.A., Gil Anaya, C.Z., Diaz Arcos, I., Gray, F., 2010b. A High-Resolution Land-Use Map: Nogales, Sonora, Mexico. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1156: 28.

Peel, M.C., Finlayson B.L., and McMahon, T.A., 2007, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification: Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1633-1644, 2007.

PRISM Climate Group, 2022. Time Series Values for Individual Locations: Oregon State University, http://prism.oregonstate.edu

Robert, E. 2015. Parting the watershed: The political ecology of a transboundary water conflict in the Colorado River Basin. University of Arizona. https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/195719/azu_etd_1770_sip1_m.pdf?isAllowed=y&sequence=1

Scott, C., Megdal, S., Oroz, L., Callegary, J., & Vandervoet, P., 2012. Effects of climate change and population growth on the transboundary Santa Cruz aquifer. Climate Research, 51(2), 159–170. https://doi.org/10.3354/cr01061

Shamir, E., Megdal, S. B., Carrillo, C., Castro, C. L., Chang, H.-I., Chief, K., … Prietto, J., 2015. Climate change and water resources management in the Upper Santa Cruz River, Arizona. Journal of Hydrology, 521, 18–33. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.062

Shamir, E., Tapia-Villaseñor, E.M., Cruz A. M.B., and Megdal, S.B. 2021, "A Review of Climate Change Impacts on the USA-Mexico Transboundary Santa Cruz River Basin". Water 13(10), 1390; https://doi.org/10.3390/w13101390

Sonoran Institute, 2016, Living River – Charting the Health of the Upper Santa Cruz River 2008-2014.

Tapia-Villaseñor, E. M., Lara-Valenzuela, C., Pineda-Martínez, L. F., Scott, C. A., 2022. Assessing water security and sustainability in transboundary river basins: Lessons from the Santa Cruz River in the United States and Mexico. *Water*, *14*(2), 233. https://doi.org/10.3390/w14020233

Tapia-Villaseñor, E.M., Shamir, E., Megdal, S.B., and Petersen-Perlman, J.D. 2020. "Impacts of Variable Climate and Effluent Flows on the Transboundary Santa Cruz Aquifer." Journal of the American Water Resources Association 56 (3): 409– 430. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12853.

Tillman, F.D, Cordova, J.T., Leake, S.A., Thomas, B.E., and Callegary, J.B., 2011, Water availability and use pilot: methods development for a regional assessment of groundwater availability, southwest alluvial basins, Arizona: U.S. Geolical Survey Scientfici Investigations Report 2011-5071, 118p.

Treese, S., Meixner, T., & Hogan, J. F. 2009. Clogging of an Effluent Dominated Semiarid River: A Conceptual Model of Stream-Aquifer Interactions 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 45(4), 1047-1062.

United States Geological Survey (USGS), 2021. USGS water data for the Nation: U.S. Geological Survey National Water Information System database. http://doi.org/10.5066/F7P55KJN.

Webb, R., y Betancourt, J.L., 1992. Climatic Variability and Flood Frequency of the Santa Cruz River, Pima County, Arizona. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2379.

Wood K.M., y E.A. Ritchie, 2013, An updated climatology of tropical cyclone impacts on the southwestern United States, Mon Weather Rev, 141, pp. 4322-4336, https://doi.org/10.1175/MWR-D-13-00078.1

WorldClim - Global climate data. WorldClim. Consultado el 15 de Abril de 2013, de https://worldclim.org/data/monthlywth.html

4. MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL

4.1. Modelo Geológico Regional

Las unidades geológicas del TSCAS son producto de una compleja evolución tectónica; la diversidad de estos eventos tectónicos y de deformación produjo una región con una complejidad geológica relativamente alta. Dentro de las porciones norte y noreste de Sonora y las porciones sur y sureste de Arizona, las rocas más antiguas forman un basamento precámbrico caracterizado por el Esquisto Pinal (1,680 millones de años antes del presente (Ma)) y las intrusiones graníticas del Mesoproterozoico. El basamento está cubierto de manera discordante por secuencias sedimentarias de plataforma, principalmente carbonatadas, depositadas durante la mayor parte del Paleozoico. Estas rocas del Precámbrico-Paleozoico fueron consideradas inicialmente por Haxel et al. (1980) como parte del basamento del Esquisto Pinal del Grupo Santa Catalina.

Las rocas mesozoicas de mayor distribución en esta área corresponden a una secuencia volcano-sedimentaria de edad Jurásica denominada Formación El Pinito en México (Gilmont, 1978) y la formación Mount Wrightson en la parte sur de Arizona (Drewes, 1971). La formación El Pinito está expuesta principalmente en las montañas del mismo nombre ubicadas al oeste del pueblo de Santa Cruz (Figura 4.1). La secuencia está dominada por riolita y lahares riolíticos intercalados con capas de arenisca de cuarzo. La formación Mount Wrightson está expuesta en las Montañas Santa Rita y tiene litologías similares a la riolita El Pinito. Tectónicamente, estas rocas representan el desarrollo de un arco volcánico continental con deposición de dunas de arena durante el Jurásico (Riggs y Haxel, 1990). Las rocas también corresponden al bloque Pápago definido por Haxel et al. (1980) como una región que se extiende desde el centro-sur de Arizona hasta la porción centro-norte de Sonora.

Las rocas del Cretácico-Terciario están ampliamente distribuidas en ambas porciones del TSCAS. La apertura del Golfo de México como parte de la evolución de un punto triple (Rueda-Gaxiola, 2004) y el desarrollo de cuencas intra-arco en el Jurásico tardío (Busby et al., 2005), permitieron que estas cuencas fueran afectadas por la transgresión marina del Cretácico temprano. Esto dio lugar a la sedimentación representada localmente por las rocas detrítico-carbonatadas del Grupo Bisbee (Ransome, 1904; Dickinson et al., 1986; González-León et al., 2008). Durante el Cretácico tardío, esta área también fue afectada por la Orogenia Laramide, desarrollando amplios pliegues con ejes orientados noroeste-sureste y una serie de cabalgamientos. Simultáneamente, los sedimentos continentales del Grupo Cabullona (Taliaferro, 1933) y la Formación Fort Crittenden (Epis, 1956) fueron depositados en estas cuencas. Estas unidades comprenden principalmente una secuencia volcano-sedimentaria detrítica que se depositó en ambientes continentales fluvio-lacustres (González-León y Lawton, 1995). Sincrónicamente con la deposición del Grupo Cabullona, se desarrolló un arco magmático continental más hacia el oeste. También se le conoce como el “Arco Laramide”, que en esta región está representado por una serie de intrusiones granítico-granodioríticas que invadieron

rocas pre-cenozoicas, y por rocas volcánicas andesíticas-dacíticas que se denominan Formación Mesa en Sonora (Valentine, 1936; Valencia-Moreno et al., 2006). Esta asociación litológica también aflora en las Montañas Huachuca y al oeste de Grosvenor Hills en Arizona (Drewes, 1980). Posteriormente, el arco magmático migró hacia el interior del continente y luego se retiró hacia la costa del Pacífico. El principal efecto de este evento fue un aumento del volcanismo riolítico-dacítico, comúnmente ignimbrítico, en la Sierra Madre Occidental y en el sur de Arizona durante el Oligoceno y el Mioceno temprano. Esta cronología de migración en el suroeste de América del Norte fue establecida por Damon et al., 1983.

La deformación extensional ha prevalecido en el noreste de Sonora y el sur de Arizona desde el Paleógeno tardío. En Sonora y el sur de Arizona, las primeras cuencas extensionales estaban llenas de conglomerados y unidades volcánicas máficas-intermedias intercaladas. Se utilizan varios nombres de formaciones para unidades de esta edad, por ejemplo, Formación Magdalena en Sonora, y Formaciones Pantano y San Manuel en Arizona (Miranda-Gasca y DeJong, 1992; Dickinson, 1991). La extensión desde mediados del Mioceno ha resultado en la formación de la provincia Basin and Range (Fenneman, 1931; Ferrari et al., 2005; Henry y Aranda-Gómez, 2000), en la que el fallamiento normal ha producido una serie de cuencas continentales delimitadas por montañas compuestas de macizo rocoso. Las cuencas están llenas de miles de pies de aluvión derivado de la erosión de los bloques montañosos. Se utilizan varios nombres de formaciones, incluyendo la Formación Báucarit en Sonora y Tinaja beds, la Formación Fort Lowell y la Formación Quiburis en Arizona (Miranda-Gasca y DeJong, 1992; Dickinson, 1991).

4.2. Estratigrafía

Se utiliza una variedad de nombres estratigráficos para unidades de edad y litología comparables (Figura 4.1 y Figura 4.2). Para simplificar el mapeo y la descripción de estas unidades en este estudio transfronterizo, proponemos una serie de unidades litoestratigráficas y litodémicas informales que abarcan ampliamente aquellas que tienen una litología y una edad similares. Estas unidades se describen en orden de la más antigua a la más joven. La información sobre las unidades del basamento se tomó de Bultman y Page (2016), el área de Río Rico y Nogales de Page et al. (2023) y las unidades de la cuenca alta del Río Santa Cruz, de Page et al. (2016). Las unidades descritas en Graybeal et al. (2015) se utilizaron a lo largo de esta sección. La información en las siguientes secciones se derivó de estas fuentes, a menos que se indique lo contrario.

Complejo Ígneo-Metamórfico Precámbrico (€TmGr, Yg, Xp)

Esta unidad incluye afloramientos que fueron cartografiados originalmente en el sur de Arizona (lado occidental de las Montañas Patagonia) por Simons (1974) como una secuencia ígneo-metamórfica rica en hornblenda, a la cual asignó una edad probablemente precámbrica. Dentro de la porción mexicana del TSCAS, hay un afloramiento restringido de rocas similares en la Sierra San Antonio (área norte-central), al este de la ciudad de Nogales a lo largo de la frontera Sonora-Arizona. En

esta localidad, la unidad consiste en una diorita fanerítica de color verde a verde oscuro (**€TmGr**). La diorita pasa localmente a una metadiorita esquistosa de grano fino a medio, que es de color marrón verdoso y muy quebradiza en afloramientos erosionados. Los minerales primarios incluyen principalmente hornblenda, oligoclasa-andesina, augita y cuarzo, y los minerales de alteración incluyen clorita y montmorillonita; la roca se clasifica como lamprófido de hornblenda hipabisal (Servicio Geológico Mexicano, 2000). Al noreste de las Montañas Patagonia y en el lado oeste de las Montañas Santa Rita, con la unidad compuesta de granodiorita a monzonita de cuarzo, localmente foliada y metamorfoseada (**Yg**) y roca metasedimentaria esquistosa (**Xp**) como el Esquisto Pinal, que está intrusionado por cuerpos ígneos precámbricos. En la Cordillera Patagónica, este complejo Precámbrico está intrusionado por granito Jurásico que contiene xenolitos de la unidad Precámbrica (Greybeal et al., 2015).

Unidad sedimentaria paleozoica temprana (Cs)

Esta unidad comprende una secuencia predominantemente detrítica que aflora únicamente del lado estadounidense del TSCAS, donde se denomina Cuarcita Bolsa (**Cs**), del periodo Cámbrico Medio (Graybeal et al., 2015). El afloramiento está restringido a la porción este-central de las Montañas Patagonia, donde consiste en una secuencia de areniscas de cuarzo gris claro intercaladas con capas locales de conglomerado con una matriz de color rojizo claro a gris púrpura, así como lutitas y calizas.

Unidad Sedimentaria del Paleozoico Tardío (Ps, Pps, Ph, Mds)

Secuencias de rocas sedimentarias, principalmente calizas y areniscas del Devónico-Pérmico que afloran en los principales altos topográficos hacia el este del TSCAS. En Canelo Hills, Arizona, la secuencia incluye las formaciones, Scherrer, Earp y Concha del Pérmico, del grupo Naco, que generalmente están compuestas de caliza dolomítica y pedernal, dolomita, arenisca masiva y limolita rojiza (**Ps**) (Graybeal et al., 2015). Está unidad también incluye la Colina de Piedra Caliza del Pérmico, formada por caliza negra intercalada con arenisca y lutita. Esta unidad también está presente en la porción este-central de las Montañas Patagonia, así como en el lado noroeste de la Cordillera de Santa Rita. En la porción este-central de Canelo Hills, también está presente la Formación Horquilla del Pensilvánico, que comprende capas delgadas de caliza azul grisácea con intercalaciones de lutita rojiza (**Ph**). En las laderas orientales de la Sierra Huachuca, afloran las formaciones del Devónico-Misisipico (**Mds**), la secuencia más antigua de esta unidad. La Formación Martin del Devónico consiste en caliza gris oscura y lutita calcárea gris rosáceo y la Formación Escabrosa del Misisípico está representada por caliza gris claro de grano grueso con abundantes fragmentos de crinoides (Greybeal et al., 2015).

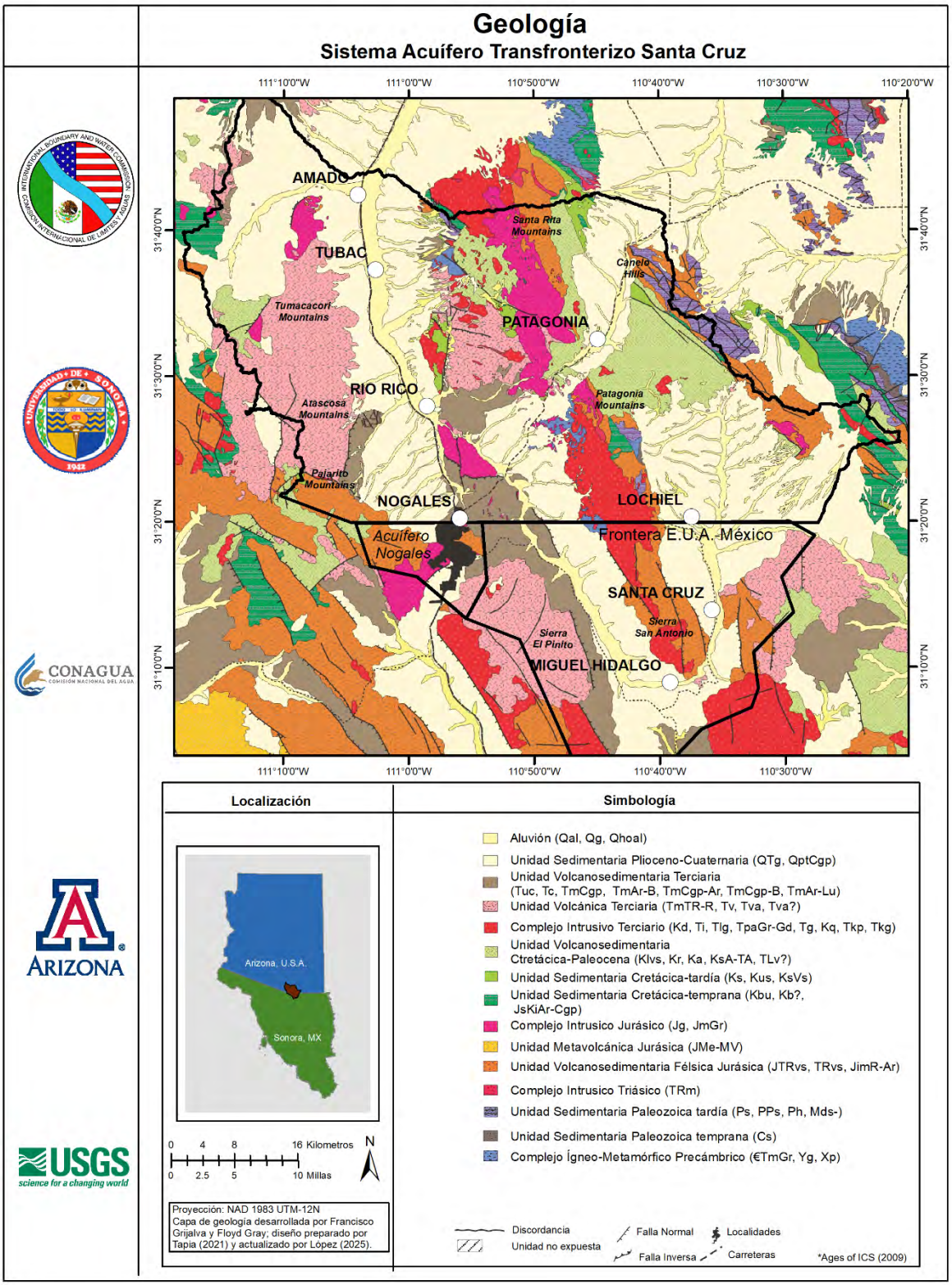


Figura 4.1 Geología del TSCAS.

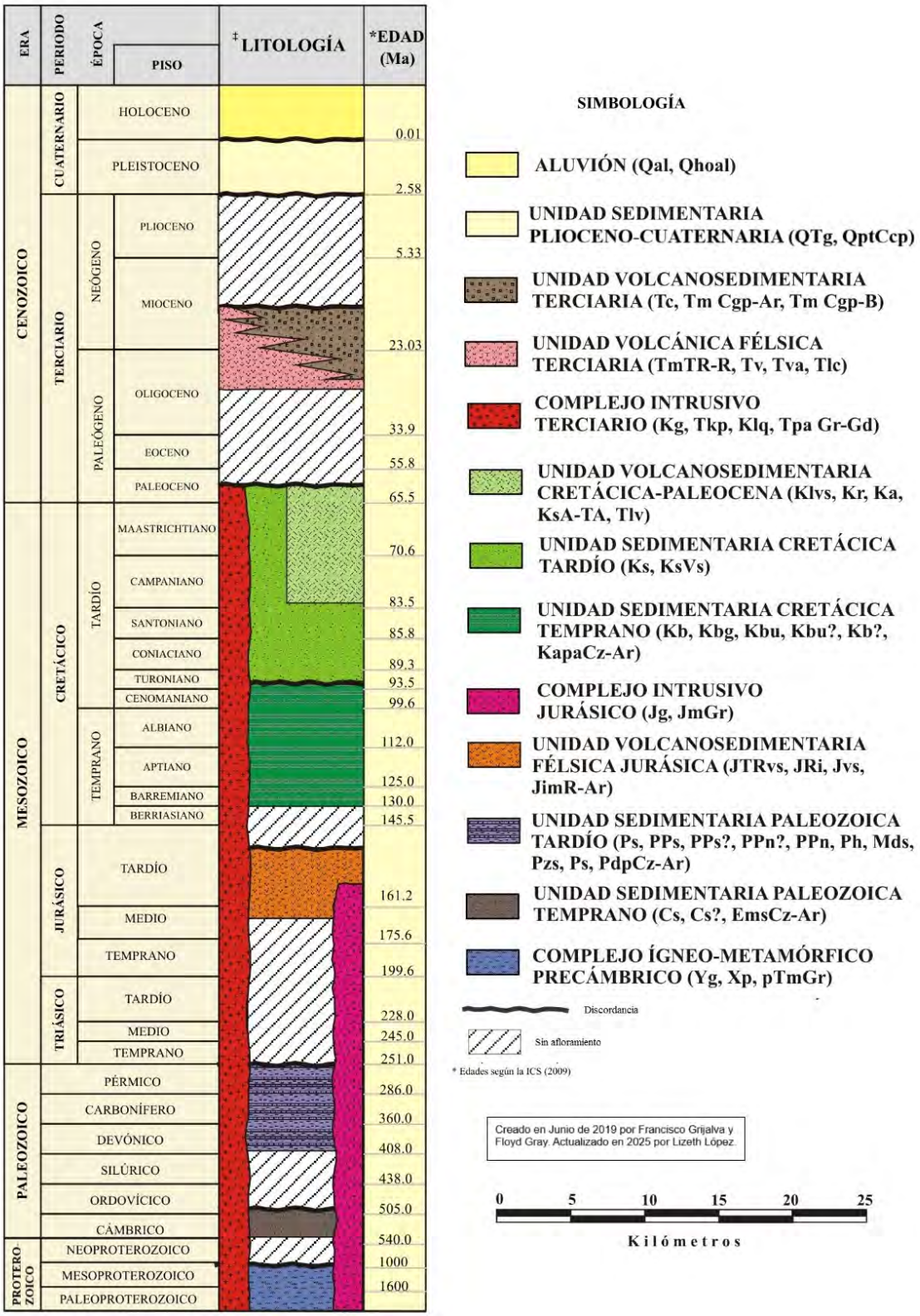


Figura 4.2 Estratigrafía del TSCAS.

Complejo Intrusivo Triásico (Trm)

Esta unidad incluye varios afloramientos de monzonita intrusiva triásica a monzonita de cuarzo en el norte de las Montañas Santa Rita en Arizona. Estas intrusiones (**Trm**) datan de 184, 190 y 210 Ma (Drewes, 1980).

Unidad volcánica-sedimentaria del Jurásico Félsico (Jim R- Ar, JTRvs, TRvs)

Esta unidad incluye principalmente secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias del Jurásico y probablemente del Triásico que se encuentran ampliamente distribuidas en los bloques montañosos más altos del TSCAS. En la Sierra El Pinito, en Sonora, Gilmont (1979) identificó una secuencia volcano-sedimentaria compuesta de riolita de cuarzo, toba y arenisca (**Jim R-Ar**). Afloramientos similares están presentes en la Sierra San Antonio, en la parte norte de la Sierra El Chivato y en la Sierra Cibuta, todos en Sonora.

Las riolitas son de color gris rosáceo y tienen varias texturas, desde porfídicas hasta equigranulares y fluidales. El cuarzo, feldespato potásico y la plagioclasa son los minerales predominantes; los feldespatos tienen una alteración sericítica muy intensa. Una de las principales características estructurales de estas riolitas es que están afectadas por dos familias de fracturas (140° NE 86° y 50° NW 88°), que le confieren una forma cúbica característica al afloramiento. Las tobas son principalmente líticas y de color gris claro a gris rosado. Localmente en la Sierra El Pinito hay afloramientos de tobas cristalinas con apariencia soldada. La arenisca es principalmente una arenisca de cuarzo de grano medio a fino, de color gris medio, con una textura típica de “sal y pimienta” en superficies frescas, debido a la abundancia de óxidos de hierro. Esta arenisca es una arenita bien seleccionada, con textura clasto-soportada, y contiene estratificación cruzada eólica; su mineralogía está dominada por cuarzo monocristalino (92%), con extinción ondulante; otros componentes son microclina alterada a sericita y arcilla (7%), y fragmentos de roca volcánica félsica (1%). Es común encontrar sobrecrecimientos de cuarzo, contactos cóncavo-convexos y localmente suturados, y minerales pesados (principalmente óxidos de hierro). Esta secuencia se asigna al Jurásico con base en una edad U/Pb de 174 Ma reportada por Stewart et al. (1986). El contacto inferior no se puede ver. La secuencia está cortada por intrusiones félsicas del Jurásico y Terciario. El contacto superior es discordante con las rocas volcánicas y clásticas más jóvenes.

En Arizona, esta unidad está representada por flujos riolíticos y tobas, flujos andesíticos, areniscas eólicas y capas rojas (**JTRvs, TRvs**) que ocurren en las Formaciones Copper Ridge, Gardner Canyon, Mount Wrightson y Pajarito, así como en Fresnal Canyon y en las secuencias Artesa en el sur y suroeste de Arizona. Los afloramientos más extensos se encuentran en las Sierras Pajarito y Santa Rita. Las rocas volcánicas que se encuentran ampliamente distribuidas en Canelo Hills también se consideran parte de esta unidad

Unidad Metavolcánica Jurásica (Jme -MV)

Esta unidad incluye una secuencia metavolcánica (**Jme-MV**), conocida como Grupo Coyotillo, que aflora localmente en el límite suroeste del área de estudio en Sonora (Sierra Guacomea). Las principales

litologías son esquisto, metariolita, metaconglomerado y metaarenisca cuyo protolito es la Formación El Pinito. Dicha secuencia se vio afectada por el metamorfismo regional de enterramiento de facies de esquisto verde (Herrera-Urbina y Pérez-Segura, 1990), atribuido a una fase Nevadiana por Morales-Montaño (1984).

Complejo Intrusivo Jurásico (Jg, JmGr)

La unidad se propone para agrupar una serie de cuerpos intrusivos del periodo Jurásico que afloran principalmente en el lado estadounidense del TSCAS, y cerca de la ciudad de Nogales en Sonora. En Sonora existen afloramientos de rocas graníticas del Jurásico en el lado noroeste de la Sierra San Antonio, donde intrusionan un granito del Precámbrico (Simons, 1974), así como en algunos cerros al suroeste de la ciudad de Nogales. Esta roca intrusiva (**JmGr**) tiene un color rojizo con variantes marrón rojizo y gris, y textura fanerítica a porfídica. El cuarzo y la ortoclasa son los minerales predominantes y la biotita es escasa o inexistente. En el área urbana de Nogales, Arizona, esta intrusión presenta un intenso fracturamiento y fallamiento. Las unidades intrusivas correlativas del sur de Arizona dan fechas K-Ar de 160 a 170 Ma (Marvin et al., 1973). Los afloramientos de estas intrusiones (**Jg**) en el lado estadounidense del TSCAS se encuentran al norte de Nogales, y en la porción norte de las Montañas Patagonia y Tumacácori. Estas intrusiones calco-alcalinas forman parte del arco magmático continental del Jurásico (Tosdal et al., 1989).

Unidad sedimentaria del Cretácico temprano (JsKiAr-Cgp, Kbu, Kb?)

Esta unidad incluye rocas sedimentarias del Cretácico Temprano correlacionadas con el Grupo Bisbee del sureste de Arizona. En el TSCAS se encuentran en ambos lados de la frontera. Del lado mexicano, afloran en la Sierra La Esmeralda en la porción centro-occidente del área de estudio, donde el conglomerado y la arenisca rojiza (**JsKiAr-Cgp**) se correlacionan con el Conglomerado Glance del Grupo Bisbee. En el lado estadounidense del TSCAS, esta unidad aflora extensamente al norte de las Montañas Huachuca, así como localmente en los flancos orientales de las Montañas Santa Rita y Patagonia y el lado occidental de Canelo Hills. En estas localidades, las formaciones Willow Canyon, Apache Canyon, Shellenberger Canyon y Turney Ranch, predominantemente detríticas, son equivalentes a las unidades superiores del Grupo Bisbee (**Kbu**). En la Sierra Pajarito, una secuencia intercalada de lutitas, limolitas, areniscas, conglomerados y calizas (**Kb**) también se considera parte de esta unidad.

Unidad sedimentaria del Cretácico superior (Ks, Kus, KsVs)

Dentro de la porción mexicana del TSCAS esta unidad aflora en el límite este de la cuenca Río Santa Cruz. Se compone de arenisca y lutita intercaladas con toba local incrustada (**KsVs**). La arenisca y la lutita son de color marrón claro y gris claro a verdoso, y se intemperizan a un color amarillento. Esta secuencia se correlaciona con el Grupo Cabullona, que está presente extensamente en el noreste de Sonora. Con base en estudios paleontológicos, ha sido asignado al Campaniano Tardío al Maastrichtiano. Los afloramientos en la porción estadounidense del TSCAS están restringidos a los flancos occidentales

de las Montañas Huachuca y Santa Rita, y al noreste de Canelo Hills, donde se encuentran principalmente rocas sedimentarias detríticas (**Ks, Kus**) correspondientes a la Formación Fort Crittenden.

Unidad volcánica-sedimentaria del Cretácico-Paleoceno (Klvs, Kr, Ka, KsA -TA, Tlv?)

Esta unidad propuesta consiste principalmente en estratos volcano-sedimentarios de composición intermedia, junto con rocas volcánicas riolíticas y volcaniclásticas. En la porción mexicana del TSCAS, esta unidad está representada por la Formación Mesa (Valentine, 1936), la cual está expuesta principalmente en el lado noreste de la Sierra El Chivato (**KsA-TA**). Estos afloramientos están dominados por andesita gris verdosa, porfídica a afanítica; localmente se presenta una facies de latita. También están presentes tobas andesíticas afaníticas-porfídicas, de color gris verdoso y gris claro con tonos violetas, y aglomerados andesíticos de color gris verdoso con clastos de varios centímetros de diámetro en una matriz de toba. La andesita está dominada por oligoclasa-andesina, mica alterada, apatita, óxidos de hierro y epidota secundaria, minerales arcillosos, sericita, clorita, hematita y calcita. La pirita oxidada se presenta como diseminaciones y en fracturas. Las rocas sedimentarias asociadas incluyen un conglomerado polimíctico de color gris a marrón verdoso, que contiene clastos subangulares y subredondeados de caliza gris-café pálido claro, toba andesítica, andesita y riolita porfídica en una matriz arenosa. Los clastos están bien ordenados y varían en tamaño desde guijarros hasta gravas. La matriz está formada por arena fina-media de color gris violeta y marrón amarillento.

La Formación Mesa sobreyace de manera discordante a unidades más antiguas del Mesozoico y premesozoico, está cubierta de manera discordante por sedimentos terciarios y rocas volcánicas. La unidad está intrusionada por plutones del arco magmático Laramíde. Su posición cronoestratigráfica es consistente con una edad radiométrica Ar / Ar de 69 ± 0.2 Ma (Wodzicki, 1995). Esta fase de vulcanismo intermedio está relacionada con la subducción de la placa Farallón debajo de Norteamérica entre el Cretácico superior y el Paleógeno inferior. Los afloramientos de esta unidad en el lado estadounidense del TSCAS forman principalmente cinturones NO-SE en el noreste de las Montañas Santa Rita y en el suroeste de Canelo Hills. En estas localidades, la litología dominante es de rocas volcánicas andesíticas a riolíticas intercaladas con conglomerados y areniscas (**Klvs**). En el oeste de Canelo Hills y las Montañas Santa Rita, predominan las tobas riodacíticas del Cretácico (**Kr**) con brechas volcánicas andesítico-dacíticas (**Ka**). Los afloramientos con intercalaciones de flujos riolíticos a andesíticos, rocas piroclásticas y algunas clásticas cerca de Patagonia, Arizona, (**Tlv?**) probablemente corresponden a esta fase volcánica.

Complejo intrusivo Terciario (Kd, Ti, Tlp, Tlg, Tpa Gr-Gd, Tg, Kq, Tkp, TKg)

Esta unidad incluye una serie de cuerpos intrusivos félsicos del Cretácico Superior al Eoceno, presentes en ambos lados del TSCAS. En México, dichas intrusiones (**Tpa Gr-Gd**) están ampliamente distribuidas, principalmente en el lado oeste de la Sierra Mariquita, y en la Sierras El Chivato y San Antonio, así como en la porción este de la Sierra El

Pinito. Estas rocas ígneas son faneríticas de grano medio y granito-granodiorita porfídica y varían en color desde el blanco grisáceo claro hasta el verde grisáceo y el rosa. Se componen de feldespato Potásico, albita-oligoclasa, cuarzo, biotita y sericita secundaria, clorita y hematita. Damon et al. (1983) consideraron que estas intrusiones formaban parte del Batolito Laramide de Sonora (90-40 Ma), una serie de intrusiones félsicas del Cretácico Superior al Eoceno, y la principal expresión del arco magmático Mesozoico-Paleógeno en Sonora. Varios investigadores han fechado los cuerpos componentes del batolito, arrojando edades de 64 Ma utilizando los métodos U/Pb, Rb/Sr y Sm/Nd (Wodzicki, 1995), y una edad U/Pb de 64 ± 3 y 69 ± 1 Ma (Anderson y Silver, 1977) en afloramientos de la región Cuitaca-Cananea. En la porción estadounidense del TSCAS, esta unidad está representada principalmente por intrusiones graníticas en las Montañas Patagonia (**Tlg**), así como dioritas y cuarzodioritas en las Montañas centrales de Santa Rita (**Kd**), también incluye una serie de intrusiones porfídicas y aplíticas félsicas (**TKp**) e intrusiones riolíticas a riodacíticas (**Ti**). En esta unidad litodémica también se incluye la granodiorita (**Kg**) y la cuarzo-monzonita (**Kq**) en el norte de las Montañas Santa Rita, y granito a monzonita del Cretácico tardío al Eoceno, granodiorita y diorita (**TKg**) del oeste de Atascosa, y pórfido de latita (**Tlp**) del sur de Patagonia, Arizona. Las rocas más jóvenes de la unidad son los stocks graníticos (**Tg**) que intruyen la unidad volcano-sedimentaria (**Tlv**) del Cretácico-Paleoceno entre las Montañas Patagonia y Canelo Hills. Esta unidad, junto con las unidades volcánicas contemporáneas del Terciario temprano (descritas abajo) hospedan y son la fuente de una extensa mineralización de edad Laramídica en el área del TSCAS, que incluye gran parte de las Montañas Patagonia y el sur de las Montañas Santa Rita.

Unidad Volcánica Terciaria (TmT-R, Tv, Tva, Tva?)

Esta unidad incluye afloramientos riolíticos del Paleógeno, que se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de ambas porciones del TSCAS. En México, la unidad aflora principalmente en la porción norte de la Sierra El Pinito y El Chivato. Consiste en una toba riolítica pseudoestratificada de color gris claro con tonos crema y gris claro. Contiene cristales de cuarzo, feldespato, plagioclasa y biotita, y fragmentos líticos volcánicos en una matriz vítreo-cristalina. Localmente, está intercalada con brecha de toba y aglomerado. También incluye riolita gris con bandas de flujo, compuesta por cuarzo, vidrio, feldespatos y óxidos de hierro en una matriz vítrea-esferulítica (**TmTR-R**). Una edad de 28 Ma (Floyd Gray, USGS, comunicación personal, 2012) y su posición estratigráfica sugieren que corresponde con el Oligoceno tardío al Mioceno temprano. En el lado estadounidense del TSCAS, se tienen afloramientos similares en las Montañas Tumacácori y Atascosa. Las rocas típicas de esta unidad están expuestas en Grosvenor Hills, donde consisten en riolita y toba riodacítica de color rojo pálido a rosado, toba lítica vítrea, aglomerado, flujos de brecha y latita. Page et al. (2016) reportaron edades Ar/Ar para esta unidad de 27 a 23 Ma (**Tv**). En la Sierra de Tumacácori, la unidad incluye flujos, rocas piroclásticas y pórfidos intrusivos de composición andesítica-dacítica, y

pórfidos de la misma composición (**Tva, Tva?**), con edades entre 24 y 39 Ma.

Unidad volcánico-sedimentaria Terciaria (TmCgp-Ar, Tm Ar -Lu, Tm Ar -B, TmCgp -B, Tm Cgp, Tuc, Tc)

La secuencia volcano-sedimentaria paleógena de la Formación Nogales en los Estados Unidos, y las unidades consideradas parte de la Formación Baucarit en México, fueron combinadas en este trabajo como parte de la unidad volcano-sedimentaria Terciaria. Para propósitos hidrogeológicos de este estudio, esta unidad se considera parte del basamento rocoso, dado que presenta un grado variable de litificación, está inclinada por un evento extensional del Terciario tardío y afectada por fallamiento. Esta unidad está cubierta por sedimentos no consolidados del Plioceno-Cuaternario, que conforman el acuífero aluvial regional del TSCAS.

La unidad incluye una secuencia de rocas continentales dominadas por conglomerados que presentan intercalaciones de areniscas, lutitas, tobas y basaltos, cuyos afloramientos están presentes predominantemente en el TSCAS central. Del lado mexicano, esta unidad consiste en conglomerados con intercalaciones de areniscas (**Tm Cgp-Ar**), y aflora principalmente al sur del Ejido Miguel Hidalgo y al oeste de la Sierra El Chivato. El conglomerado es de color marrón claro, formando estratos gruesos bien consolidados, con clastos subangulares y subredondeados de tamaño variable de riolita, granito, andesita y toba andesítica, dentro de una matriz arenosa que es localmente tobácea. Las lentes y estratos de arenisca son del mismo color marrón claro. También está representado por un conglomerado polimíctico con intercalaciones de basalto (**Tm Cgp-B**), en la margen izquierda del Río Santa Cruz al sureste de Nogales y al noreste de la Sierra El Chivato. En estas localidades, el conglomerado se presenta como un estrato de espesor medio de color marrón claro bien consolidado, que contiene clastos subangulares de riolita, toba riolítica, granito y cuarcita en una matriz arenosa. Localmente, la matriz es principalmente tobácea, con capas y lentes de arenisca. Esta unidad también incluye flujos de basalto que contienen vesículas rellenas de olivino y calcita que aparecen interestratificadas con el conglomerado polimíctico. Estas rocas se consideran parte de la Formación Baucarit en Sonora (Dumble, 1900; King, 1939), que se formó a partir del relleno sedimentario de cuencas extensionales generadas durante el Mioceno. En la porción sureste de la Sierra El Pinito, esta unidad incluye una secuencia sedimentaria clástica de grano fino a medio, de estratificación delgada que consiste en arenisca y lutita alternadas con capas tobáceas y conglomeráticas locales y capas de yeso fibroso (**Tm Ar-Lu**). La arenisca es de color gris claro a marrón rojizo y tiene un carbonato. La lutita es de color gris claro a marrón amarillento e incluye pequeñas capas delgadas de caliza y localmente tiene pliegues intraformacionales. También se incluye en esta unidad una secuencia detrítica con basaltos intercalados (**Tm Cgp y Tm Ar-B**) inmediatamente al sureste de Nogales.

En la porción estadounidense de la cuenca, los afloramientos de la Unidad volcánico-sedimentaria terciaria cerca de Nogales están dominados por conglomerados y areniscas con miembros volcánicos

y piroclásticos (**Tuc**). En el norte de la Sierra Huachuca, la unidad está representada por un conglomerado con clastos subredondeados (**Tc**), con escasos depósitos de asentamientos, y cuerpos de toba porfídica y andesita. Simons (1974) agrupó estas unidades litoestratigráficas como la Formación Nogales, para la cual se reportan fechas isotópicas (40Ar/39Ar) entre 13.23 Ma y 17.38 Ma (Houser et al., 2004). Page et al. (2016) dividieron la Formación Nogales en los cuadrángulos Río Rico y Nogales, en tres miembros informales, desde la base hasta la parte superior: A) Miembro Proto Canyon: conglomerado volcaniclástico y arenisca moderadamente a débilmente consolidada, conglomerado arcósico arenoso y arcilloso, y gravas arcillosas; B) Miembro del Arroyo Nogales: arenisca y conglomerado volcaniclástico moderadamente consolidado, extensamente fracturado y con abundantes fragmentos de pumita; y C) Miembro Mariposa: areniscas y conglomerados volcaniclásticos calcáreos moderadamente a débilmente consolidados, limolita, arcillas, con flujos de basalto fechados en 11.67 Ma. Los sedimentos de la Formación Nogales fueron depositados por arroyos y flujos de detritos en abanicos aluviales que flanquean la cuenca alta del Río Santa Cruz y en playas en las partes axiales de la cuenca.

Unidad Sedimentaria Plioceno-Cuaternaria (QTg, QptCgp)

Esta unidad agrupa una serie de sedimentos gruesos y finos no consolidados que afloran ampliamente en la porción central del TSCAS. Son sedimentos continentales que consisten en gravas, arenas y limos. Están débilmente estratificados o aparecen como una sola masa. Estos sedimentos rellenan los valles de Basin-and-Range con orientaciones noroeste-sureste y norte-sur y afloran a lo largo de las estribaciones de los flancos. Sobreyacen discordantemente a las formaciones más antiguas, y en algunos lugares cubren una falla normal.

Aluvión (Qal, Qg, Qhoal)

Esta unidad incluye sedimentos fluviales del Cuaternario depositados en canales y planicies de inundación de ríos y afluentes principales. Consiste en material no consolidado que incluye grava, arena, limo y arcilla, resultado de la erosión de rocas preexistentes.

4.3. Geología Estructural

Las estructuras de compresión (cabalgamientos y pliegues) generadas durante la era del Fanerozoico temprano y medio (Drewes, 1980) fueron sucedidas por la generación de fallas normales más grandes y generalizadas. La geomorfología moderna del TSCAS es el resultado de la actividad extensional del Cenozoico, con fallas normales como el conductor estructural más típico. Los sistemas de fallas resultantes podrían ser importantes para la hidrogeología del TSCAS debido al potencial de conexiones de agua subterránea entre montañas y cuencas.

Las estructuras extensionales dentro del TSCAS aparecen como conjuntos de fallas con dos orientaciones preferenciales (Drewes, 1972 y 1980). El primero es un sistema NNO-SSE, que se presenta como fallas de mayor continuidad longitudinal (hasta

30 km). En la porción mexicana del TSCAS, estas fallas representan el límite de la cuenca Santa Cruz con altos topográficos en las Sierras de San Antonio y El Pinito. En Estados Unidos, las fallas limitan las Montañas Santa Rita y Atascosa, y el flanco oeste de Canelo Hills (Figura 4.1). La segunda familia de estructuras tiene una orientación preferencial NE-SO, y ocurre principalmente en Canelo Hills en Arizona.

Los datos aeromagnéticos y gravimétricos indican que la falla de Mt. Benedict, la cual controla la ubicación del Río Santa Cruz al este de Nogales, continúa hacia el norte por debajo del relleno sedimentario al norte de la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales (PITAR) de Nogales (Page et al., 2016). Esta falla también controla la dirección y ubicación del río en la parte norte de la cuenca (Gettings y Houser, 1997). Un tercer conjunto de estructuras predominantemente con orientación NE-SO y de edad del Mioceno define prominentemente la cuenca y el canal aluvial del arroyo Sonoita. Se observan zonas de falla y fracturas subparalelas al sureste del interior de la falla principal de Patagonia, en rocas Pre-Cenozoicas (Page et al., 2016; Page et al., 2023; Menges, 1981). Estas fallas/fracturas no fueron cartografiadas en mapas regionales de mayor escala, pero son importantes por su capacidad de transportar agua subterránea hacia las tierras bajas interiores del macizo cristalino. Además, se presentan fallas y fracturas menos penetrativas como resultado de la inyección de magma y fluidos calientes de etapas tardías durante los eventos de mineralización hidrotermal asociados a la orogenia Laramídica. Estos eventos dieron lugar a fracturamientos localizados y/o alteración química que permitieron el ascenso de fluidos y gases ricos en metales, favoreciendo la deposición de abundantes minerales a lo largo de las sierras centrales y septentrionales de las Montañas Patagonia y el sur de las Montañas Santa Rita, dentro del área de estudio del TSCAS.

4.3.1. Revisión de estudios geofísicos en la porción de Arizona del TSCAS

Uno de los elementos principales de un estudio hidrogeológico es la elaboración de un modelo conceptual de la geología del subsuelo. Para crear el modelo, se requiere información directa procedente de pozos perforados dentro del área de estudio, así como información indirecta obtenida de métodos geofísicos aéreos y terrestres. La interpretación de los datos permite comprender y realizar estimaciones de los elementos fundamentales necesarios para elaborar el modelo conceptual, incluidos: 1) geometría, extensión y límites de la cuenca, definiendo las unidades hidrogeológicas y las estructuras que afectan la cuenca, incluyendo fallas que pueden actuar como conductores de flujo o como barreras; y 2) las características del relleno sedimentario, incluyendo el espesor, la granulometría, las variaciones laterales y las propiedades hidráulicas que pueden interpretarse como barreras/límites de flujo laterales y verticales, como el basamento hidrogeológico

En la parte estadounidense del TSCAS, una serie de estudios geofísicos han ayudado a determinar la estructura de la cuenca Santa Cruz. Lysonski et al. (1981) presenetaron un mapa de anomalía gravimétrica residual en Arizona. Richard et al. (2007) estimaron la profundidad del basamento en el

aluvión de Basin-and Range, basándose en estudios de Oppenheimer y Sumner (1980, 1981). En ambos estudios se incluye el área del TSCAS en Arizona. Baldyga (2001) realizó un estudio de gravimetría y magnetometría en el flanco occidental de las Montañas Santa Rita. Bultman (1999) estimó la estructura y geometría del subsuelo del Valle de San Rafael. En el mapa de anomalías residuales de la parte estadounidense del TSCAS (Lysonski et al., 1981), se identifican al menos cuatro anomalías negativas importantes (-40 miligals/mGal). Las anomalías probablemente representan las áreas de mayor profundidad del suelo rocoso dentro de la cuenca. Dos de estas anomalías están orientadas de norte a sur a lo largo del curso actual del Río Santa Cruz, y otra está presente a lo largo del flanco occidental de las Montañas Santa Rita. La cuarta anomalía con una respuesta gravimétrica similar se encuentra al oeste de las Montañas Atascosa, en un área pequeña y aislada entre rocas volcánicas del Terciario al norte de Bear Valley. Al este, tres concentraciones de anomalías de entre -34 y -36 mGal se encuentran en el Valle de San Rafael y el norte de la Patagonia, mientras que otras anomalías inferiores a -20 mGal se ubican al este de Nogales y al noreste de Canelo Hills.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos y el Consejo de Recursos Minerales de México realizaron conjuntamente uno de los primeros estudios binacionales en 1977. El producto de esta cooperación fue un mapa gravimétrico preliminar de anomalía de Bouguer simple de esta región (Consejo de Recursos Minerales [México] y USGS [1977]). En la porción que coincide con el TSCAS, se asume que las anomalías negativas de Bouguer en Arizona corresponden a las principales depresiones de la cuenca y corresponden a características similares definidas por Lysonski et al. (1981). Una zona con una anomalía de -160 mGal se encuentra debajo del Río Santa Cruz en Sonora. Sin embargo, es importante señalar que la distribución de estaciones gravimétricas tomadas para generar el mapa en la lamina 3 de Gettings y Houser (1997) se concentra en territorio estadounidense, con pocas estaciones en el lado mexicano.

Estudios posteriores actualizaron y ampliaron estos resultados. Para el Valle de San Rafael, Bultman (1999, 2013) reportó una profundidad máxima del suelo rocoso de aproximadamente 1 km cerca del centro de la cuenca con sedimentos someros poco profundos en los lados norte y oeste de la cuenca. Para los sedimentos Plioceno-Cuaternarios no consolidados que representan el acuífero aluvial, Bultman (1999) reportó un espesor de hasta 300 m. El Valle de San Rafael es un semigraben con la falla primaria al este. En el flanco occidental de las Montañas Santa Rita, Baldyga (2001) realizó un estudio gravimétrico y magnetométrico en el área de Cottonwood Canyon, estimando un espesor de 200 m de sedimento que va en aumento hacia el oeste, sobreyaciendo un basamento normalmente fallado. Gettings y Houser (1997) utilizaron el campo de anomalías de gravedad residual para calcular la profundidad hasta la roca firme en la parte central del TSCAS. (Lamina 3 en Gettings y Houser, 1997). Ellos delimitaron áreas donde los sedimentos tienen un espesor superior a 500 m en las subcuencas Amado, Tubac, Río Rico y Nogales. Richard et al. (2007) concluyeron que algunas cuencas en el

TSCAS tienen profundidades del orden de 490 m, aunque la profundidad de la cuenca Santa Cruz cerca de Amado probablemente supere los 950 m. Recientemente, Bultman y Page (2016) utilizaron datos aeromagnéticos y gravimétricos previamente publicados, anomalías de gravedad de Bouguer y transformaciones de conductividad-profundidad de un estudio electromagnético transitorio para interpretar la morfología y la estructura del suelo rocoso de la cuenca superior Santa Cruz entre Río Rico y Nogales, Arizona. Sus estimaciones de la profundidad del suelo rocoso coincidían con las de estudios anteriores.

4.4. Modelado Geofísico y Análisis de la Estructura de la Cuenca en la porción Sonorense del TSCAS

Los esfuerzos para determinar la estructura y profundidad de la cuenca Santa Cruz en Sonora han sido limitados. En la porción mexicana del TSCAS, el estudio "Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Santa Cruz, Estado de Sonora, Primera Etapa", realizado en 2011 por la UNISON (Minjarez et al., 2011), incluyó evaluaciones geofísicas. Esta sección del capítulo presenta el modelado gravimétrico utilizado para generar una visión generalizada de la geometría del basamento. El modelo se basó en los perfiles gravimétricos de un estudio de terreno realizado a lo largo del Río Santa Cruz. En la parte de Sonora del área de estudio, se realizaron estudios gravimétricos a lo largo de los tramos este, sur y oeste del Río Santa Cruz (Figura 4.3). Los modelos gravimétricos se realizaron y evaluaron por separado para cada uno de estos tres tramos. El perfil gravimétrico ubicado en el lado este de la Sierra San Antonio tiene orientación N-S y consta de 10 estaciones (Figura 4.4). En la mitad sur del mapa de anomalías residuales (Figura 4.4), hay un bajo gravimétrico en el límite sur del perfil, delimitado al norte por un alto pronunciado; este comportamiento se interpreta como el producto de una falla normal, con una profundidad hasta el suelo rocoso en el bloque fallado hacia el sur que alcanza unos 800 m. La mitad norte del perfil corresponde a una cuenca con un basamento irregular menos profundo afectado por estructuras enterradas. Los resultados del modelo predicen una profundidad máxima al suelo rocoso de 450 m entre las estaciones 36 y 46, y en la estación 32 (Figura 4.4). A lo largo del tramo occidental del río, se modeló un perfil de trece estaciones con orientación NNO-SSE (Figura 4.5). Las anomalías residuales indican profundidades de basamento de hasta 400 m en el centro del perfil, y similar al levantamiento anterior, un alto gravimétrico junto a un bajo gravimétrico en la parte sureste, interpretado como una profundidad al basamento de 600 m al sur de un alto estructural enterrado (Minjarez et al., 2011).

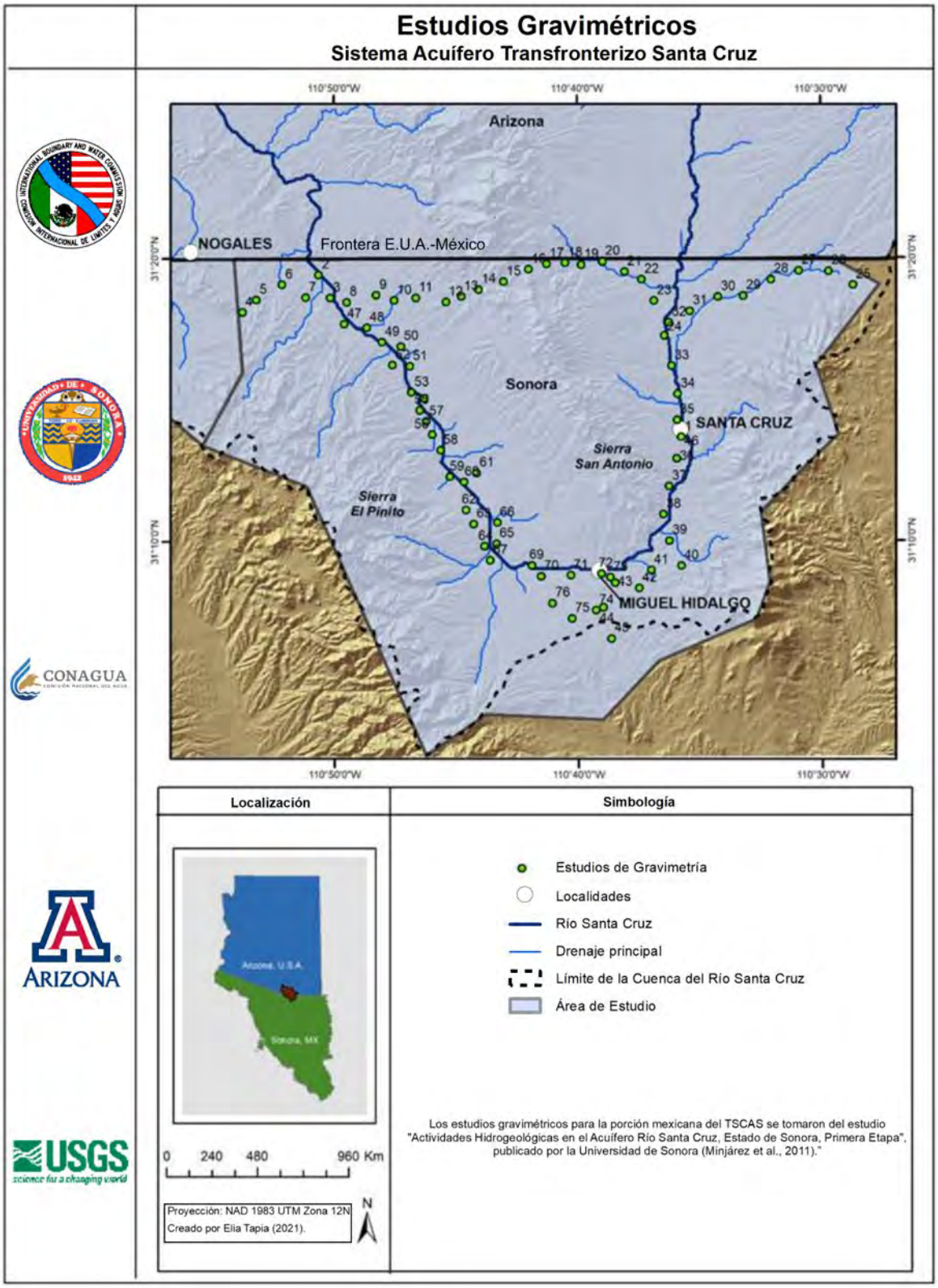


Figura 4.3 Estudios de Gravimetría en el Acuífero Río Santa Cruz en México.

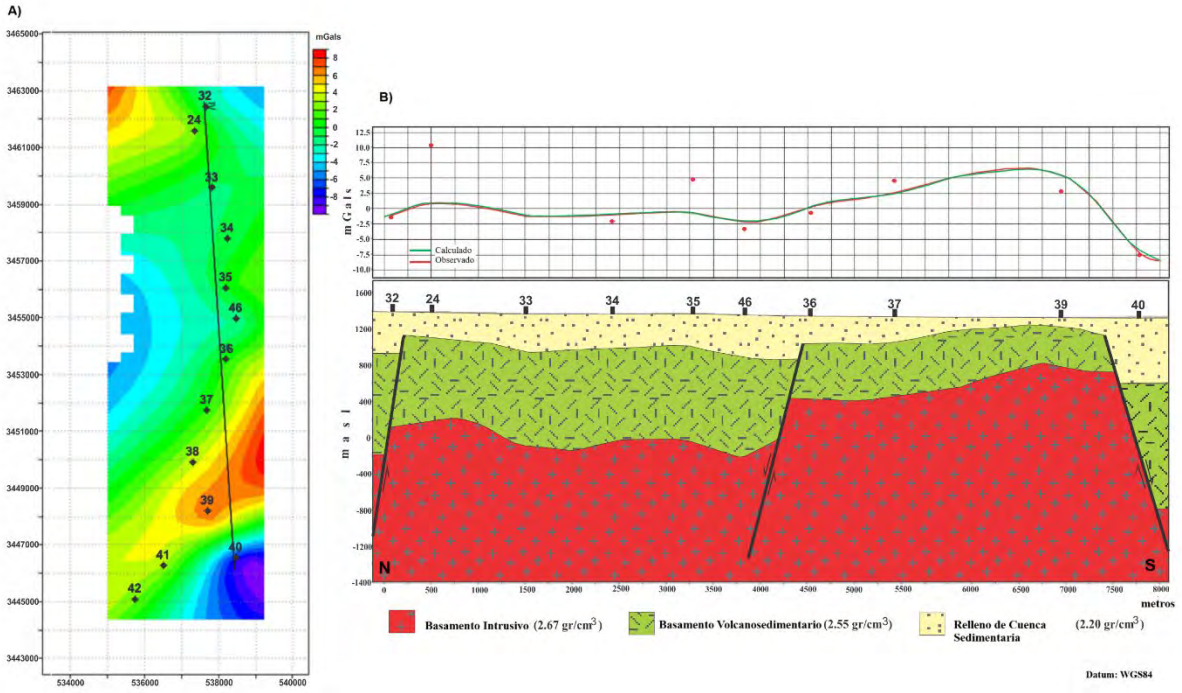


Figura 4.4 Mapa y sección transversal de la anomalía residual (A) y el perfil gravimétrico NS (B) a lo largo del Río Santa Cruz en el lado este de la porción de Sonora del TSCAS.

El perfil gravimétrico a lo largo del tramo sur del río, orientado E-O, incluye 6 estaciones (Figura 4.6). La anomalía residual negativa en la estación 40 (Figura 4.6) corresponde a la anomalía negativa identificada en el extremo sur del perfil este (Figura 4.4). La profundidad al basamento modelada es de alrededor de 450 m en la estación 71, aumentando a más de 700 m hacia el extremo este del perfil en la estación 40.

El sistema de horst y graben está bien definido en la parte sonorense del TSCAS, donde los bloques tectónicos levantados corresponden a la Sierra El Pinito y la Sierra San Antonio. Estas cadenas montañosas están formadas principalmente por rocas volcánicas del Mesozoico y rocas volcánicas e intrusivas del Terciario. Están delimitados por fallas regionales normales y separados por valles alargados rellenos principalmente de sedimentos continentales del Terciario y Cuaternario que representan cuencas extensionales de tipo semigraben y graben. Estas características han sido mapeadas superficialmente por el Servicio Geológico Mexicano (2000). El sistema de lineamientos y fallas noreste-suroeste se expresa principalmente en disposición rectilínea de los principales ríos y arroyos. Con base en el análisis gravimétrico, el TSCAS generalmente se comporta como una unidad tectónica con una profundidad al basamento que aumenta desde el límite norte en la porción de Arizona (ver Sección 4.3), así como desde esta misma frontera hacia el sur, en la porción mexicana.

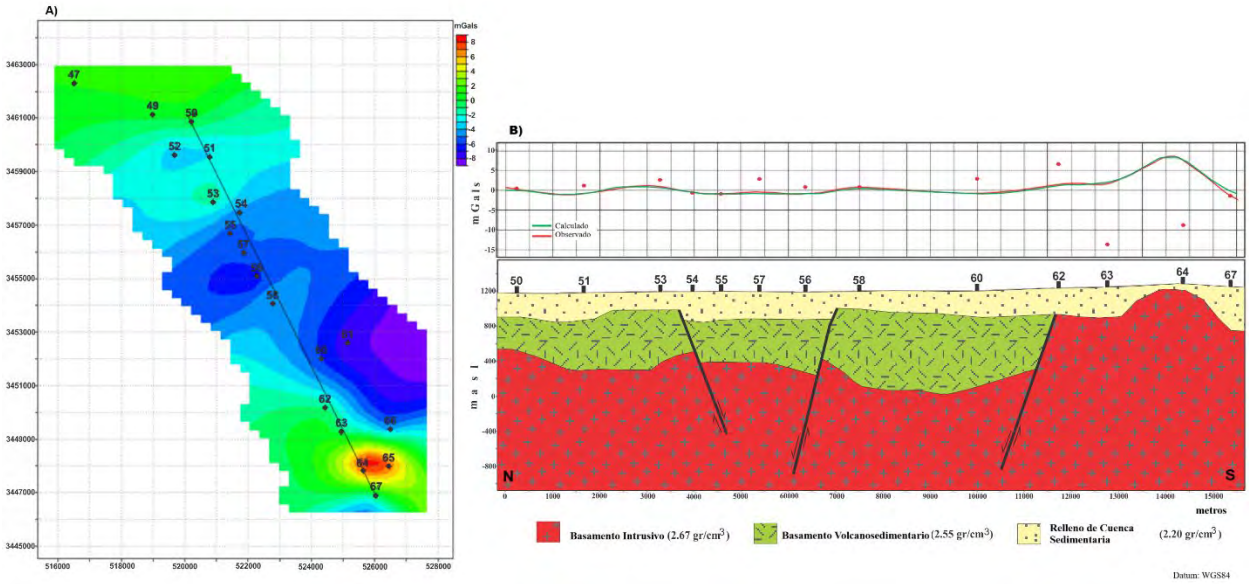


Figura 4.5 Mapa y sección transversal de la anomalía residual (A) y el perfil gravimétrico NS (B) a lo largo del Río Santa Cruz en el lado oeste de la porción de Sonora del TSCAS.

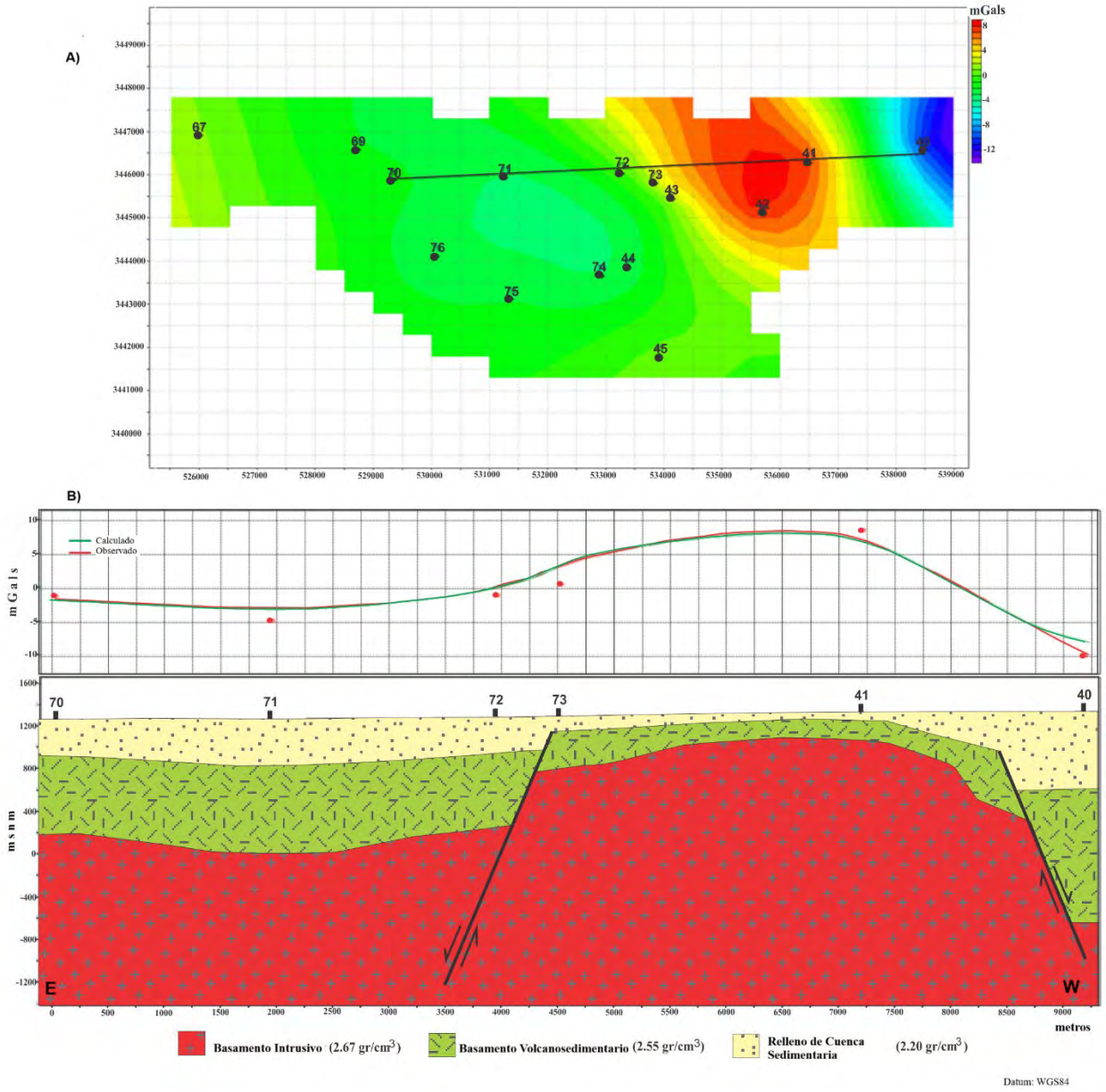


Figura 4.6 Mapa y sección transversal de la anomalía residual (A) y el perfil gravimétrico EO (B) a lo largo del Río Santa Cruz en el lado sur de la porción de Sonora del TSCAS.

4.5. Características del Relleno Sedimentario

En la porción de Arizona del TSCAS, la Formación Nogales (ver Sección 4.1) es una secuencia conglomerática del Mioceno que es representativa de las primeras etapas de sedimentación en las cuencas extensionales del Terciario en esta región. En el TSCAS, su espesor varía desde los 900-1000 m en la parte más profunda (subcuenca Amado, al norte de Tubac) hasta los 240 m entre las subcuencas Tubac y Rio Rico (Gettings y Houser, 1997; Nelson, 2007). La unidad sedimentaria Plioceno-Cuaternaria (ver Sección 4.2) (**QTg, QptCgp**) consiste principalmente en depósitos de arena y grava del Plioceno al Pleistoceno con consolidación de moderada a pobre. Tiene un espesor de hasta 60 m en el tramo del Río Santa Cruz ubicado entre la frontera y la PITAR, con distribución y espesor aumentando hacia el norte alcanzando un máximo de entre 260 y 365 m (Gettings y Houser, 1997; Nelson, 2007). Sobre esta unidad y a lo largo del cauce del río, el aluvión más joven (**Qal, Qg, Qhoal**) está compuesto por sedimentos uniformes de edad Cuaternaria con poco limo o arcilla, con un espesor típico de entre 10 y 45 m. El acuífero regional está contenido dentro de estas dos unidades y se ha utilizado para aplicaciones tales como riego de cultivos y minería desde principios del siglo XX (Nelson, 2007).

En el Valle de San Rafael, el relleno sedimentario no consolidado de la cuenca es delgado, con un espesor de aproximadamente 100 m que se desprende de las laderas de la Cordillera Patagónica en el oeste, que aumenta a 300 m hacia el centro y al este del valle. El modelo de gravedad presentado por Bultman (1999) indica un espesor máximo de casi 1 km para la Formación Nogales combinada con el relleno sedimentario de la cuenca superior.

La roca del basamento en la cuenca del arroyo Sonoita consiste en rocas precámbricas y mesozoicas cubiertas por rocas volcánicas y sedimentarias del Paleógeno. El relleno sedimentario suprayacente consiste en depósitos detríticos, aluviales y fluviales, y encima de estos, aluviones de los canales cuaternarios, con un espesor de hasta 27 m de gravas, arenas y limos no consolidados.

Para la porción sonorense del TSCAS, las diferentes litologías que componen la Formación Báucarit (unidad volcano-sedimentaria terciaria) representan secuencias que son equivalentes en edad a la Formación Nogales en Arizona. Sin embargo, el relleno sedimentario Plioceno-cuaternario no consolidado no ha sido correlacionado con las unidades que se mencionan para la porción estadounidense. Se presenta un resumen de un estudio electromagnético transitorio (TEM) para la porción sonorense de la cuenca de Santa Cruz, con el fin de apoyar la caracterización del relleno sedimentario. Las variaciones en la resistividad pueden estar relacionadas con cambios en el tamaño del grano del sedimento, especialmente si se dispone de información litológica directa adicional de la perforación para su comparación (Minjarez at al., 2011).

Se modeló un perfil de resistividad E-O de 10 km de longitud ubicado en la parte sur de la cuenca a lo largo del Río Santa Cruz utilizando cinco sondeos TEM (Figura 4.7). El relleno sedimentario se caracteriza por resistividades de entre 6 y 36 Ω-m, y

el material con resistividad superior a 40 Ω-m se interpreta como suelo rocoso. Estos valores de resistividad y las diferentes divisiones descritas en las Figura 4.7 y Figura 4.8 se tomaron de Minjarez et al. 2011. Proponemos que la unidad resistiva U1, como se define en los perfiles del lado sonorense (Figura 4.7 y Figura 4.8) corresponde al aluvión reciente, compuesto de material no consolidado, no saturado, como grava, arena y lodo. Mientras que, la unidad resistiva U2 y sus subdivisiones (U2a, U2b y U2c) corresponden a sedimentos del aluvión antiguo, incluyendo arcillas, arena gravosa, y conglomerado. Finalmente, la unidad U3 representa materiales rocosos de baja permeabilidad: U3a incluye rocas volcánicas que van desde zonas no fracturadas y de alta resistividad hasta zonas ligeramente fracturadas y de menor resistividad, mientras que U3b comprende rocas intrusivas no fracturadas y de baja permeabilidad (basamento). En términos generales, el basamento (U3b) es más profundo en la porción occidental del perfil, en el cual se encuentran sedimentos más gruesos, probablemente gravas, en la parte basal, con resistividades de entre 30 y 36 Ω*m (U2c). Esta unidad también puede contener porciones de la Formación Báucarit. Es probable que una porción significativa de este relleno sedimentario sea predominantemente arenoso, según un rango de resistividad entre 10 y 30 Ω*m (U2b).

En el TEM SC-13, a 200 m de profundidad, se identificó la presencia de un sedimento de grano fino (probablemente depósitos lacustres) con resistividades inferiores a 10 Ω*m (U2a). El espesor máximo interpretado del relleno sedimentario en este perfil de resistividad fue de más de 400 m, lo cual es consistente con la profundidad del basamento definida en el perfil gravimétrico para esta porción de la cuenca. La Figura 4.8 muestra un perfil de resistividad orientado perpendicularmente al perfil anterior. Se basa en un análisis de tres sondeos TEM y tiene una orientación norte-sur. En este perfil se interpretó un espesor máximo de 300 m para el relleno sedimentario, con una distribución granulométrica similar al perfil de la Figura 4.7.

El acuífero Nogales del lado sonorense, se identifica como una unidad de 100 m de espesor compuesta por grava no consolidada, arenas y arcillas. El espesor promedio de este aluvión cerca de Nogales Wash y otros canales principales es de aproximadamente 30 m. Estos sedimentos se consideran parte de los aluviones más antiguos y jóvenes que se encuentran sobre depósitos continentales y volcánicos fracturados del Terciario (GAS-CONAGUA, 2024)

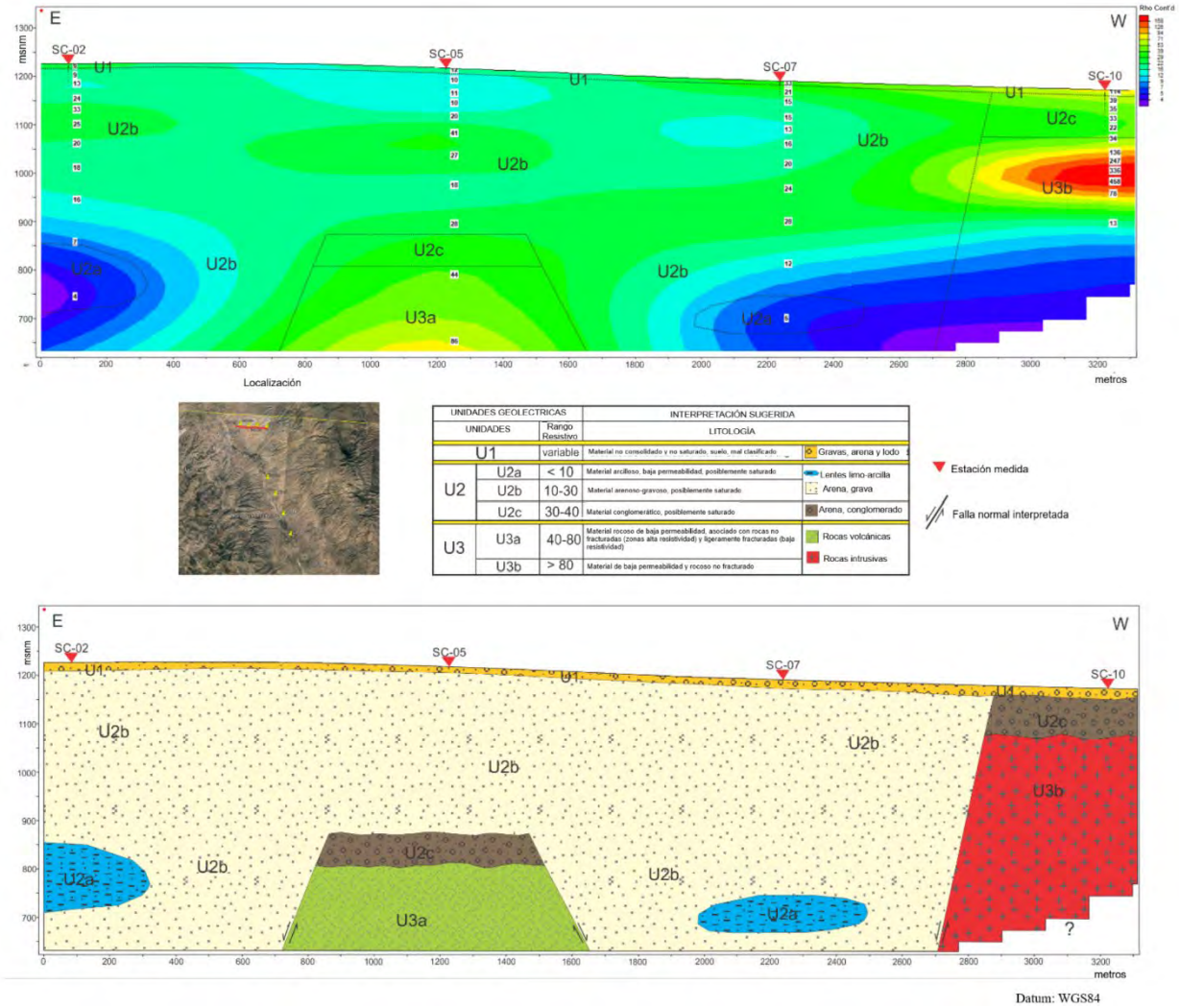


Figura 4.7 Perfil EO de resistividad basado en TEM ubicado en la porción de Sonora del área de estudio a lo largo del Río Santa Cruz.

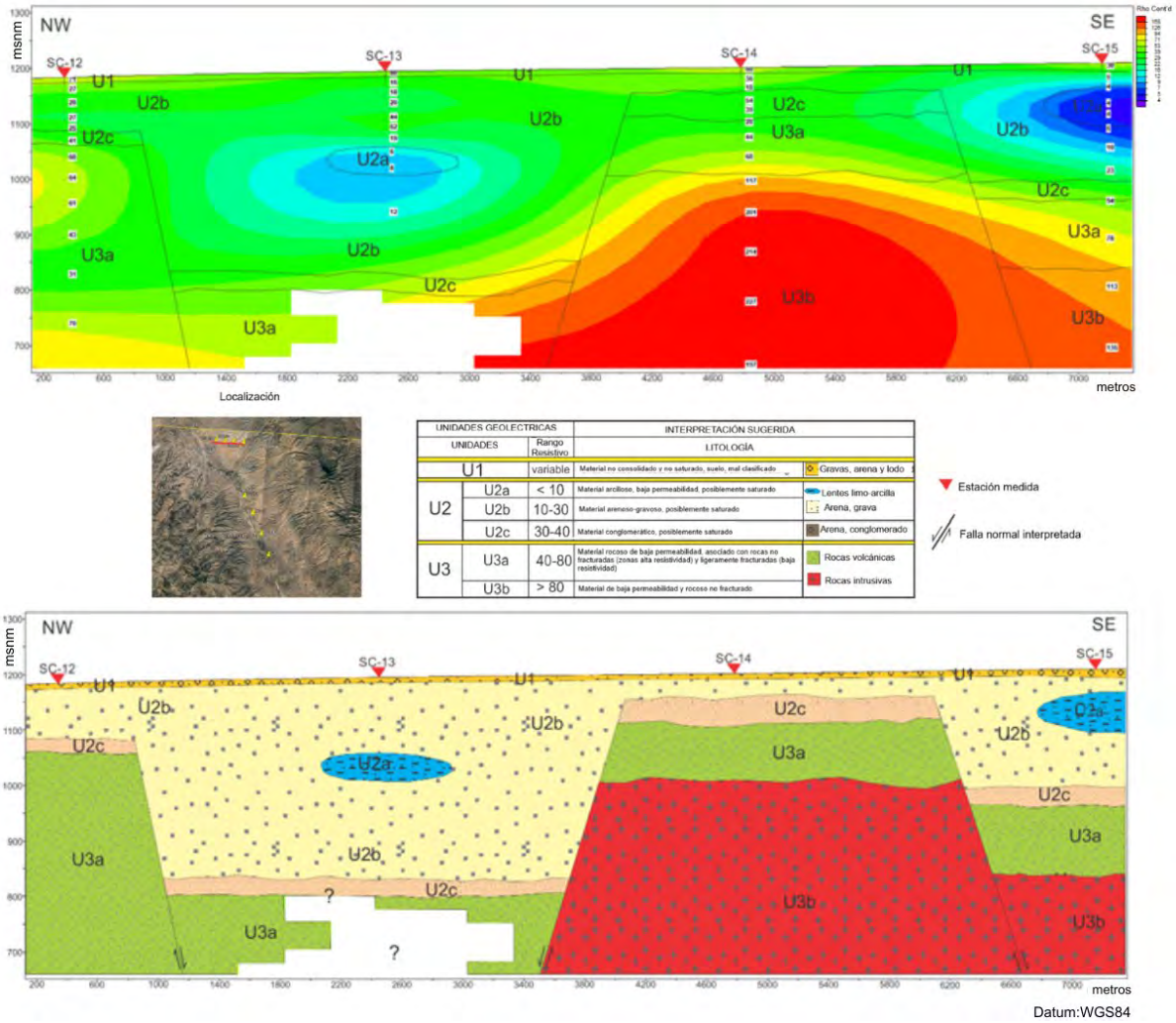


Figura 4.8 Perfil de resistividad basado en TEM ubicado en la parte de Sonora del área de estudio.

4.6. Conclusiones

La geología de la zona en la que se ubica el TSCAS, es el resultado de una compleja evolución tectónica y de cuenca sedimentaria, dando como resultado una región de gran complejidad geológica. Para simplificar el mapeo y descripción de las unidades litológicas en ambos lados de la frontera, se propusieron una serie de unidades litoestratigráficas y litodémicas informales.

Dentro de la porción centro-norte de Sonora y la porción centro-sur de Arizona, las rocas más antiguas forman parte de un basamento precámbrico caracterizado principalmente por intrusiones félsicas a intermedias, así como rocas metasedimentarias en las Montañas Patagonia, correlacionadas con el esquisto Pinal (1680 Ma). Estas rocas están cubiertas principalmente por secuencias carbonatadas que representan depósitos marinos de aguas someras del Paleozoico medio a tardío.

Las rocas triásicas y jurásicas dentro de esta región sugieren un amplio período de actividad magmática. Las rocas intrusivas del Triásico-Jurásico

de las Montañas Santa Rita, Patagonia y Tumacácori, y una secuencia volcano-sedimentaria del Jurásico, expuesta principalmente en las Montañas Pajarito y Santa Rita en Arizona y en la Sierra El Pinito en Sonora, son representativas de este evento Mesozoico. Las rocas cretácicas se distribuyen principalmente en la porción norte del área del TSCAS y están representadas por secuencias sedimentarias de edad Cretácico Superior que afloran al noreste y suroeste de Patagonia.

Las rocas cenozoicas se encuentran ampliamente distribuidas en ambas porciones del TSCAS, e incluyen un complejo intrusivo, unidades volcánicas y volcano-sedimentarias de edad Terciaria, así como una unidad Plioceno-Cuaternaria representada por sedimentos clásticos.

La geomorfología moderna de las áreas del TSCAS resulta de la actividad extensional del Cenozoico, incluyendo fallas normales extensionales de gran ángulo. Como resultado de este evento extensional, existen fallas normales con dos orientaciones preferenciales, un sistema NNO-SSE y NO-SE. La tendencia NO-SE representa los eventos más recientes del fallamiento del Basin and Range en la región.

Los estudios geofísicos en la porción estadounidense del área del TSCAS sugieren un espesor de 200 a 500 m para las unidades Plioceno-Cuaternarias no consolidadas, mientras que para la porción sonorense del TSCAS se ha sugerido un espesor máximo de 450 m para estos sedimentos.

Una planeación y coordinación de estudios binacionales que utilicen métodos geofísicos podrían refinar la comprensión de la distribución temporal y espacial del agua y la distribución espacial de los materiales geológicos.

Descargo de responsabilidad: El uso de nombres comerciales, de empresas o de productos se realiza únicamente con fines descriptivos y no implica respaldo alguno por parte de los Gobiernos de México y de los Estados Unidos.

Bibliografía

Anderson, TH, Silver, LT, 1977, edades de isótopos U-Pb de plutones graníticos cerca de Cananea, Sonora: Economic Geology, v. 72; 827-836.

Baldyga, CA, 2001, Relación de las fallas en los sedimentos de la cuenca con la gravedad y la expresión magnética de sus sistemas de fallas subyacentes: Informe de archivo abierto del Servicio Geológico de EE. UU. 01-502, 113 p.

Bultman, M. W., 2013, Investigation of the structure and lithology of bedrock concealed by basin fill, using ground-based magnetic-field-profile data acquired in the San Rafael Basin, southeastern Arizona (U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5038). U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. http://www.usgs.gov/pubprod

Bultman, MW, 1999, Geometría, estructura y litología oculta de la cuenca de San Rafael, sureste de Arizona: Informe de archivo abierto del Servicio Geológico de EE. UU. 99-399, https://pubs.usgs.gov/of/1999/0399/.

Bultman, MW, y Page, WR, 2016, Morfología y estructura del lecho rocoso, cuenca superior de Santa Cruz, centro-sur de Arizona, con datos de estudios electromagnéticos transitorios: Informe de archivo abierto del Servicio Geológico de EE. UU. 2016–1152, 49 p., http:/ /dx.doi.org/10.3133/ofr20161152

Busby, CT, Bassett, K., Steiner, MB, Riggs, NR, 2005, Controles climáticos y tectónicos en las cuencas intraarcos del Jurásico relacionadas con la deriva hacia el norte de América del Norte: Documento especial de la Sociedad Geológica de América 393-13; 359-376.

Damon, PE, Clark, KC, Shafiqullah, M., 1983, Geocronología de los depósitos de pórfido de cobre y mineralización relacionada de México: Canadian Journal of Earth Sciences, 20, 1052-1071

Dickinson, W.R., 1991, Tectonic setting of faulted Tertiary strata associated with the Catalina core complex in southern Arizona: Geological Society of America Special Paper 264, 106 p.

Dickinson, WR, Klute, MA, y Swift, PN, 1986, La cuenca del Bisbee y su relación con las relaciones paleogeográficas y paleotectónicas del Mesozoico tardío entre las regiones de la Cordillera y el Caribe, en Abbott, PL, ed., Estratigrafía del Cretácico, oeste de América del Norte: Sección del Pacífico, Sociedad de Paleontólogos y Mineralogistas Económicos, Libro 46, pp. 51-62.

Drewes, H., 1971, Mesozoic stratigraphy of the Santa Rita Mountains, southeast of Tucson, Arizona: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 658-C, 81 p.

Drewes, H., 1972, Cenozoic rocks of the Santa Rita Mountains, southeast of Tucson, Arizona: Professional Paper. https://doi.org/10.3133/pp746

Drewes, H., 1980, Mapa tectónico del sureste de Arizona: Servicio geológico de EE. UU. MI-Map 1109, 2 láminas con texto.

Dumble, ET, 1900, Notes on the geology of Sonora, Mexico: American Institute of Mining and Petroleum Engineering Transactions., v. 29, p. 122–152.

Epis, RC, 1956, Geología de las Montañas Pedregosa, Condado de Cochise, Arizona, Ph.D. disertación. Berkeley, Universidad de California, 263 págs.

Fenneman, N.M., 1931, Physiography of western United States: MCGraw-Hill, Nueva York, 534 pp

Ferrari, L. Tagami, T., Eguchi, M., Orozco-Esquivel, MT, Petrone, Ch. M., Jacobo-Albarrán, J., López-Martínez, M., 2005, Geología, geocronología y configuración tectónica del vulcanismo del Cenozoico tardío a lo largo del suroeste del Golfo de México: La provincia alcalina oriental revisitada, Revista de vulcanología e investigación geotérmica, 146, 284-306.

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2615) Río Santa Cruz, Estado de Sonora. 30p. Consultado el 11 de Diciembre de 2025 en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2615.pdf

Gettings, ME, Houser, BB, 1997, Basin Geology of the Upper Santa Cruz Valley, Pima and Santa Cruz Countys, Southeastern Arizona: US Geological Survey Open-File Report 97-676, 46 p.

Gilmont, L., 1978. Geology of the Puerto La Bandera area, Sonora, Mexico. Master thesis, Northern Arizona University, Flagstaff, AZ. USA.

Gilmont, NL, 1979, Geología del área de Puerto La Bandera, Sonora, México: Flagstaff, Northern Arizona University, M. Sc. tesis, 114p.

González-León, CM, Lawton, TF, 1995, Estratigrafía, ambientes depositacionales y origen de la cuenca de Cabullona, noreste de Sonora: Estudios sobre el Mesozoico de Sonora y Áreas Adyacentes, Jacques-Ayala, C.; González-León, CM, Roldán -Quintana, J. (Eds.) Geological Society of America Special Paper 301, 121-142.

Graybeal, F.T., Moyer, L.A., Vikre, P.G., Dunlap, P., and Wallis, J.C., 2015, Geologic map of the Patagonia Mountains, Santa Cruz County, Arizona: U.S. Geological Survey Open-File Report 2015–1023, 10 p., 1 sheet, scale 1:48,000, https://dx.doi.org/10.3133/ofr20151023.

Haxel, G., Wright, JE, May, DJ, Tosdal, RM, 1980, Geología de reconocimiento de las rocas mesozoicas y cenozoicas inferiores de la reserva indígena Papago del sur, Arizona: un informe preliminar. Estudios en el oeste de Arizona, Jenney, JP, Stone, C. (Eds.): Arizona Geological Society Digest 12, 17-29.

Henry, CD, Aranda-Gómez, JJ, 2000, Las interacciones de las placas controlan el Mioceno medio-tardío, el proto-Golfo y la extensión de Cuenca y Cordillera en la Cuenca y Cordillera del Sur: Tectonofísica, 318, 1-26.

Herrera-Urbina, Saúl y Pérez-Segura, Efrén., 1990. Facies de metamorfismo en las secuencias de las inmediaciones del Poblado de Estación Llano, Sonora. Bol. Depto. Geol. Unison, 1990. Vol. 1 y 2; Pág.; 7-28.

Houser, BB, Peters, L., Esser, RP y Gettings, ME, 2004, Stratigraphy and tectonic history of the Tucson Basin, Pima County, Arizona, basado en el pozo Exxon State (32)-1: US Geological Survey Scientific Investigations Informe 2004-5076, 33 p.

King, RE, 1939, Reconocimiento geológico en el norte de la Sierra Madre Occidental de México: Geol. Soc. Soy. Toro, 50, pág. 1625-1722.

Lysonski, JC, Aiken, CLV y Sumner, JS., 1981, The complete residual Bouguer gravity anomaly map [of Arizona]: Arizona Bureau of Geology and Mineral Technology Open-File Report 81-24, 2 p., 23 hojas, escala 1:250.000.

Marvin, R.F., Stern, T.W., Creasey, S.C., and Mehnert, H.H., 1973, Radiometric ages of igneous rocks from Pima, Santa Cruz, and Cochise Counties, southeastern Arizona: U.S. Geological Survey Bulletin 1379, 27 p.

Menges, C. M.,1981, The Sonoita Creek basin: Implications for late Cenozoic Tectonic evolution of basins and ranges in southeastern Arizona (unpublished M.S. thesis): University of Arizona, Tucson, 239 p.

Minjarez Sosa, I., Monreal Saavedra, R., Grijalva Noriega, F.J., Ochoa Granillo, J.A., Tapia Villaseñor, E.M., Rangel Medina, M., Montijo González, A., 2011. Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Río Santa Cruz, Estado de Sonora, Primera Etapa. Hermosillo, Sonora.

Miranda-Gasca, M.A., and DeJong, K.A., 1992, The Magdalena mid-Tertiary extensional basin, in Clark, K.F.; Roldán-Quintana, Jaime; and Schmidt, R.H., eds., Geology and mineral resources of northern Sierra Madre Occidental, Mexico: El Paso, Geological Society, Guidebook for the Field Conference, p. 377-384.

Morales - Montaño, M., 1984, Bosquejo geológico del cuadrángulo " Estración Llano- Imuris H: Bol. Depto Geol., Uni-Son, v. 1.

Nelson, Keith M.,2007 "Modelo de flujo de agua subterránea del área de gestión activa de Santa Cruz a lo largo del río Santa Cruz, dominado por efluentes, los condados de Santa Cruz y Pima, Arizona". Departamento de Recursos Hídricos de Arizona.

Oppenheimer, JM y Sumner, JS, 1980, Mapa de profundidad a roca madre, provincia de Basin and Range, Arizona: Tucson, Universidad de Arizona, Departamento de Geociencias, Laboratorio de Geofísica, 1 hoja, escala 1:1,000,000.

Oppenheimer, JM y Sumner, JS, 1981, Modelado de gravedad de las cuencas en la provincia de Basin and Range, Arizona: Arizona Geological Society Digest, v. 13, p. 111-115, 1 hoja, escala 1:1.000.000.

Page, W.R., Bultman, M.W., Berry, M.E., Turner, K.J., Menges, C.M., Gray, F., Paces, J.B., VanSistine, D.P., Morgan, L.E., and Havens, J.C., 2023, Geologic map and hydrogeologic investigations of the upper Santa Cruz River basin, southern Arizona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3490, 2 sheets, scale 1:50,000, 73-p. pamphlet, https://doi.org/10.3133/sim3490.

Page, WR, Menges, CM, Gray, Floyd, Berry, ME, Bultman, MW, Cosca, MA y VanSistine, DP, 2016, mapa geológico de los cuadrángulos de 7,5' de Río Rico y Nogales, condado de Santa Cruz, Arizona: EE. UU. Mapa de Investigaciones Científicas del Servicio Geológico 3354, 32 p. folleto, apéndice, 2 hojas, escala 1:24.000, http://dx.doi.org/10.3133/sim3354.

Ransome, FL, 1904, Geología y depósitos minerales del Bisbee Quadrangle; Arizona: Documento profesional del Servicio Geológico de EE. UU. 21, 167.

Richard, SM, Shipman, TC, Greene, Lizbeth, Harris, RC, 2007, Profundidad estimada hasta el lecho rocoso en Arizona: Tucson, Arizona Geological Survey Digital Geologic Map 52 (DGM-52), versión 1.0, 1 archivo de Adobe Acrobat (PDF) (8 p., 1 hoja), diseño escala 1:1.000.000.

Riggs, NR, Haxel, GB, 1990, El arco magmático del Jurásico temprano a medio en el sur de Arizona: Plutones a dunas de arena, Excursiones geológicas a través de la región del desierto de Sonora, Arizona y Sonora, Gehrels, GE, Spencer, JE (Eds.): Documento especial 7 del Servicio Geológico de Arizona, 90-103.

Rueda-Gaxiola, J., 2004, A triple junction in the Gulf of México: Implications for Deep petroleum exploration: Geofísica Internacional, Julio-septiembre, año/vol. 43/003; Universidad Nacional Autónoma de México; 395-414.

Servicio Geológico Mexicano 2000, Carta Geológico-Minera Nogales, H12-2 Sonora, Esc. 1:250,000. Map.

Simons, F.S.,1974, Geologic map and sections of the Nogales and Lochiel quadrangles, Santa Cruz County, Arizona: U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map I-762, 9 p., 1 sheet, scale 1:48,000

Stewart, JH, Anderson, TH, Haxel, GB, Silver, LT y Wright, JE, 1986, Paleogeografía del Triásico tardío de la Cordillera del Sur; el problema de una fuente de detritos voluminosos en la Formación Chinle de la región de la Meseta de Colorado: Geological Society of America, Geology, v. 14, no.7, p. 567-570

Taliaferro, NL, 1933, An Ocurrence of Upper Cretaceous Sediments in Northern Sonora Mexico: Jour Geol. vol. 41 núm. 91, 12-37.

Tosdal, RM, Haxel, GB y Wright, JE, 1989, Geología jurásica de la región del desierto de Sonora, sur de Arizona, sureste de California y extremo norte de Sonora: construcción de un arco magmático de margen continental, en Jenney, JP y Reynolds, SJ, Evolución geológica de Arizona: Tucson, Arizona, Compendio de la Sociedad Geológica de Arizona, vol. 17, pág. 397-434.

Valencia-Moreno, M., Ochoa-Landín, L., Noguez-Alcántara, B., Ruiz, J., Pérez-Segura, E., 2006, Características metalogenéticas de los depósitos de tipo pórfido cuprífero en México y su situación en el contexto mundial: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Revisión de Algunas Tipologías de Depósitos Minerales en México, Tomo LVIII, núm. 1; 1-26.

Valentine, W.G., 1936, Geology of the Cananea Mountains, Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 47, 53-86.

Wodzicki, W.A., 1995, The evolution of Laramide Igneous rocks in Porphyry Copper Mineralization in the Cananea District, Sonora, Mexico: Doctoral Thesis, The University of Arizona, Tucson, Arizona, pp 181.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1. Introducción

Las formaciones geológicas, la estratigrafía y la estructura geológica constituyen la base física de un acuífero. Para realizar un análisis hidrológico de los acuíferos, la información geológica también debe interpretarse con respecto a las propiedades hidráulicas de los sedimentos, rocas y estratos, tanto a escala local y regional. En este caso, las propiedades hidráulicas son las características de los medios geológicos que afectan el flujo y almacenamiento del agua subterránea.

Las características que afectan el flujo y el almacenamiento a escala regional o local incluyen la porosidad de las rocas y los sedimentos, el grado de consolidación, homogeneidadfracturación de la roca, el espesor y la disposición tridimensional de los estratos rocosos y las capas aluviales. En esta sección, se resume una compilación sobre lo que se conoce del TSCAS, con base en los trabajos previos que definen el basamento hidrogeológico y la hidroestratigrafía del área de estudio. Estas características se integran en una interpretación general de la hidrogeología, comenzando con una discusión sobre el basamento que limita y subyace a los sedimentos del valle. Esto es seguido por la división de sedimentos aluviales en tres unidades hidroestratigráficas (U1, U2 y U3), que son zonas lateralmente extensas de permeabilidad similar. Los métodos y la información sobre la profundidad hasta el basamento rocoso (o, más comúnmente, “profundidad al basamento”) y la distribución de rocas y sedimentos que forman la cuenca geológica se discuten en el Capítulo 4.

5.2. Basamento Hidrogeológico

El TSCAS está incluido en la Provincia Fisiográfica “Basin and Range” compuesta por valles con tendencia generalmente norte-sur separados por sierras asociadas a fallamiento en bloques que actúan como límites de la cuenca (Fenneman, 1931). En la literatura mexicana, el TSCAS se encuentra dentro de dos provincias fisiográficas: Sierras y Llanuras del Norte y la Sierra Madre Occidental. La roca que comprende estas montañas también subyace al aluvión que rellena los valles, donde sirve como basamento hidrogeológico para los acuíferos aluviales primarios (ver Figura 5.1).

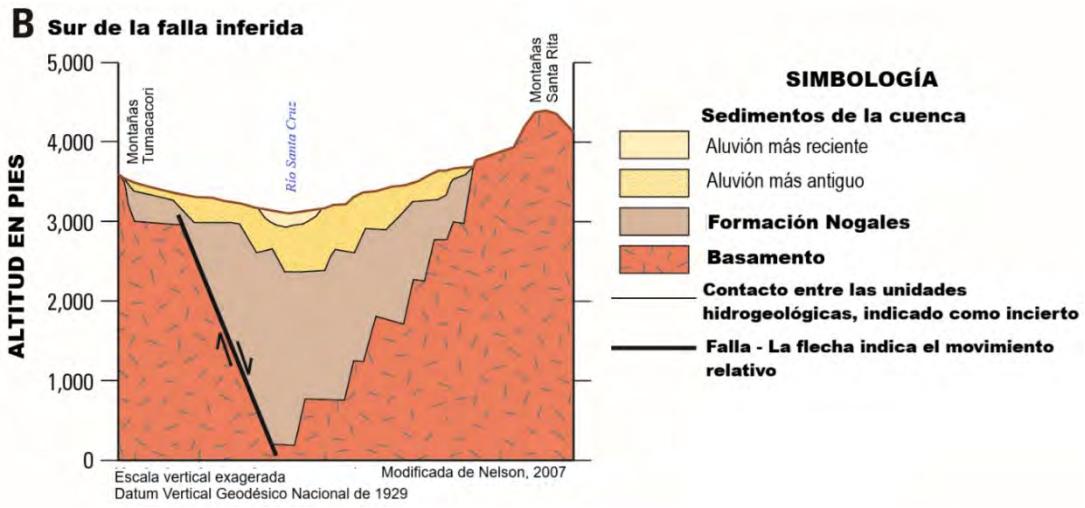


Figura 5.1 Sección transversal generalizada del Río Santa Cruz superior y de las unidades hidrogeológicas cerca del límite norte del TSCAS dentro de Arizona, tomada del perfil B-B' de la figura 3 de Anning y Leenhouts (2010), modificada de Nelson (2007).

Con base en la composición de las rocas en las montañas, el basamento hidrogeológico en el TSCAS probablemente está compuesto por secuencias sedimentarias y volcano-sedimentarias del Paleozoico a Mesozoico, superpuestas e intrusionadas por granitos del Jurásico y Terciarios y otras rocas volcánicas más jóvenes. Estas rocas típicamente son de baja porosidad y permeabilidad con fracturas que incrementan localmente su capacidad de almacenamiento y transmisión del agua (Davidson, 1973). El potencial de flujo y almacenamiento de agua subterránea en estas rocas no ha sido evaluado, pero la productividad de los acuíferos de roca fracturada depende principalmente de su extensión (local o regional), capacidad para transmitir agua, fuente de recarga y características físicas como el tamaño, la conectividad y el número de fracturas por unidad de área. Page et al. (2018) describieron la "Unidad de confinamiento del basamento inferior" en el área de Ambos Nogales. Consiste en monzonita jurásica, así como rocas sedimentarias, volcánicas y plutónicas del Cretácico, y rocas volcánicas y plutónicas terciarias (Paleoceno y Oligoceno). Un ejemplo de secuencias volcano-sedimentarias del Terciario, que forman parte de la "Unidad de confinamiento del basamento inferior", se encuentra en las rocas volcánicas de Grosvenor Hills, en el lado este de la cuenca, las cuales presentan escasa fracturación y no son altamente transmisivas. Sin embargo, se señala que en algunos lugares las rocas volcánicas terciarias (Oligoceno), como en el Cañón Peck, pueden estar altamente fracturadas debido a fallas en el frente de la sierra y se ha observado que transmiten agua subterránea desde las zonas altas de las Montañas Tumacácori hacia los sedimentos de la cuenca. Estas unidades volcánicas de la Unidad de confinamiento inferior pueden desempeñar un papel importante en el movimiento del agua subterránea a través de la conexión hidráulica entre acuíferos en cuencas de relleno. Así, en el presente estudio se

clasifican entre las unidades hidroestratigráficas de la cuenca e incluyen la Formación Nogales en la porción estadounidense del TSCAS (Page et al., 2016a, b), y varios estratos asociados con la Formación Báucarit en la parte mexicana de la región de estudio.

5.3. Unidades Hidroestratigráficas

Las unidades hidroestratigráficas descritas por Maxey (1964) son cuerpos de roca (o aluvión) lateralmente extensos que funcionan como acuíferos y se diferencian por tener propiedades hidráulicas distintas.

Aunque tradicionalmente descritas como unidades de acuífero, las unidades hidroestratigráficas son actualmente ampliamente definidas con base en sus propiedades hidráulicas y pueden incluir materiales de baja permeabilidad.

La división de un acuífero en unidades hidroestratigráficas respalda el desarrollo de modelos conceptuales y numéricos de flujo de agua subterránea.

Anning y Leenhouts (2010) y Coes et al. (2000) indicaron que el acuífero regional en la cuenca de relleno en la porción estadounidense del TSCAS está compuesto principalmente de unidades de relleno sedimentario no consolidado. Estas son también las unidades más importantes en la porción mexicana del acuífero (GAS-CONAGUA, 2024a, y 2024b). Corresponden a las unidades definidas en el Capítulo 4 como parte de la Unidad Sedimentaria Plio-Cuaternaria. Además, las rocas sedimentarias y volcánicas fracturadas funcionan localmente como fuentes importantes de agua subterránea en el TSCAS. La interacción hidráulica entre rocas cristalinas fracturadas y materiales no consolidados ocurre principalmente a lo largo de zonas de falla y frentes de montaña, donde las fracturas pueden transmitir localmente agua subterránea hacia los acuíferos sedimentarios. Esto incluye las rocas volcánicas del Oligoceno mencionadas anteriormente, así como las rocas variablemente consolidadas y fracturadas de la Formación Nogales.

Para este estudio, las unidades hidroestratigráficas que se describen a continuación (Figura 5.2) se definieron con base en:

a) Estudios hidrogeológicos previos en Arizona y Sonora.
b) Sus propiedades eléctricas, derivadas de estudios Electromagnéticos Transitorios (TEM) en el lado mexicano (IDEAS, 2008; ver Capítulo 4), así como los parámetros hidráulicos previamente estimados en el lado estadounidense (ver Capítulo 6 para una discusión detallada).
c) La correlación con las características hidrogeológicas de los acuíferos vecinos en Agua Prieta, San Pedro, y Bacanuchi en el lado mexicano (Minjarez et al., 2011).

Unidad Hidroestratigráfica 1: Esta unidad corresponde a material grueso (arenas gravosas y gravas arenosas) que no está consolidado, de pobre a moderadamente estratificado y de moderadamente a bien clasificado. Está confinada a los principales cauces fluviales en el área de estudio y corresponde a la unidad de aluvión más joven definida por Nelson (2007). Esta unidad tiene las conductividades hidráulicas más altas en el área de estudio. Nelson (2007) sugirió una conductividad hidráulica superior a unos 35 m/día

para los sedimentos en esta unidad en la porción de Arizona del TSCAS.

Unidad Hidroestratigráfica 2: En la porción estadounidense del TSCAS, esta unidad corresponde a la unidad de aluvión más antigua de Nelson (2007), los depósitos de relleno de cuenca del Mioceno al Pleistoceno temprano de Page et al. (2018), y el relleno de cuenca superior e inferior mencionado por Pool y Dickinson (2007) en la cuenca del Río San Pedro. Esta unidad está compuesta por gravas interestratificadas no consolidadas a débilmente consolidadas, de grava arenosa y arena gravosa. Nelson (2007) mencionó una conductividad hidráulica de moderada a alta para estos sedimentos, aunque probablemente disminuye con la profundidad debido a la compactación. Esta unidad hidroestratigráfica también incluye sedimentos finos (limo y arcilla) con baja conductividad hidráulica que están presentes principalmente en forma de cuerpos lenticulares. Estos pueden generar condiciones de confinamiento local en el acuífero. Por ejemplo, en la porción mexicana, IDEAS (2008) los identificó como zonas de baja resistividad eléctrica, clasificadas como depósitos de limo y arcilla. En la parte estadounidense del área de estudio, Culberston et al. (2010) identificaron una zona de baja resistividad eléctrica en el Río Santa Cruz al oeste de Nogales, que también puede estar compuesta de sedimentos finos. Localmente esta unidad puede actuar como una capa confinante y es visible en algunas de las secciones hidrogeológicas creadas a partir de perfiles de resistividad (Figura 5.3).

Unidad Hidroestratigráfica 3: En esta unidad se incluyen acuíferos de roca fracturada, entre los que se encuentran las secuencias clásticas de las Formaciones Nogales y Báucarit. También se incluyen rocas que se encuentran debajo de estas formaciones, como las rocas félsicas terciarias fracturadas o meteorizadas y las rocas volcánicas e intrusivas más antiguas que posiblemente podrían contener agua subterránea. Los estudios hidrogeológicos y estratigráficos de la Formación Nogales en Arizona (Page et al., 2016a, 2016b, 2018) indican que partes de la formación pueden proporcionar fuentes más profundas de agua subterránea para el TSCAS.

5.4. Definición del Sistema del Acuífero

Al definir un sistema acuífero, es necesario tener en cuenta los factores que controlan el movimiento de las aguas subterráneas. Anning y Leenhouts (2010) encontraron que el flujo de agua subterránea en el TSCAS es similar a otros sistemas de Sierras y Valles en el sur de Arizona. Por ejemplo, las variaciones en las altitudes del nivel del agua en el relleno de la cuenca tienden, en general, a imitar las variaciones en la elevación de la superficie terrestre, de modo que el agua subterránea fluye típicamente desde los márgenes de la cuenca hacia los cauces de los arroyos. Con frecuencia, a medida que el agua subterránea se desplaza hacia el cauce del arroyo y contribuye al drenaje del valle, la dirección del flujo cambia de manera que converge hacia el cauce, al que intersecta en un ángulo agudo, con líneas de flujo orientadas en sentido descendente del gradiente hacia la salida de la cuenca.

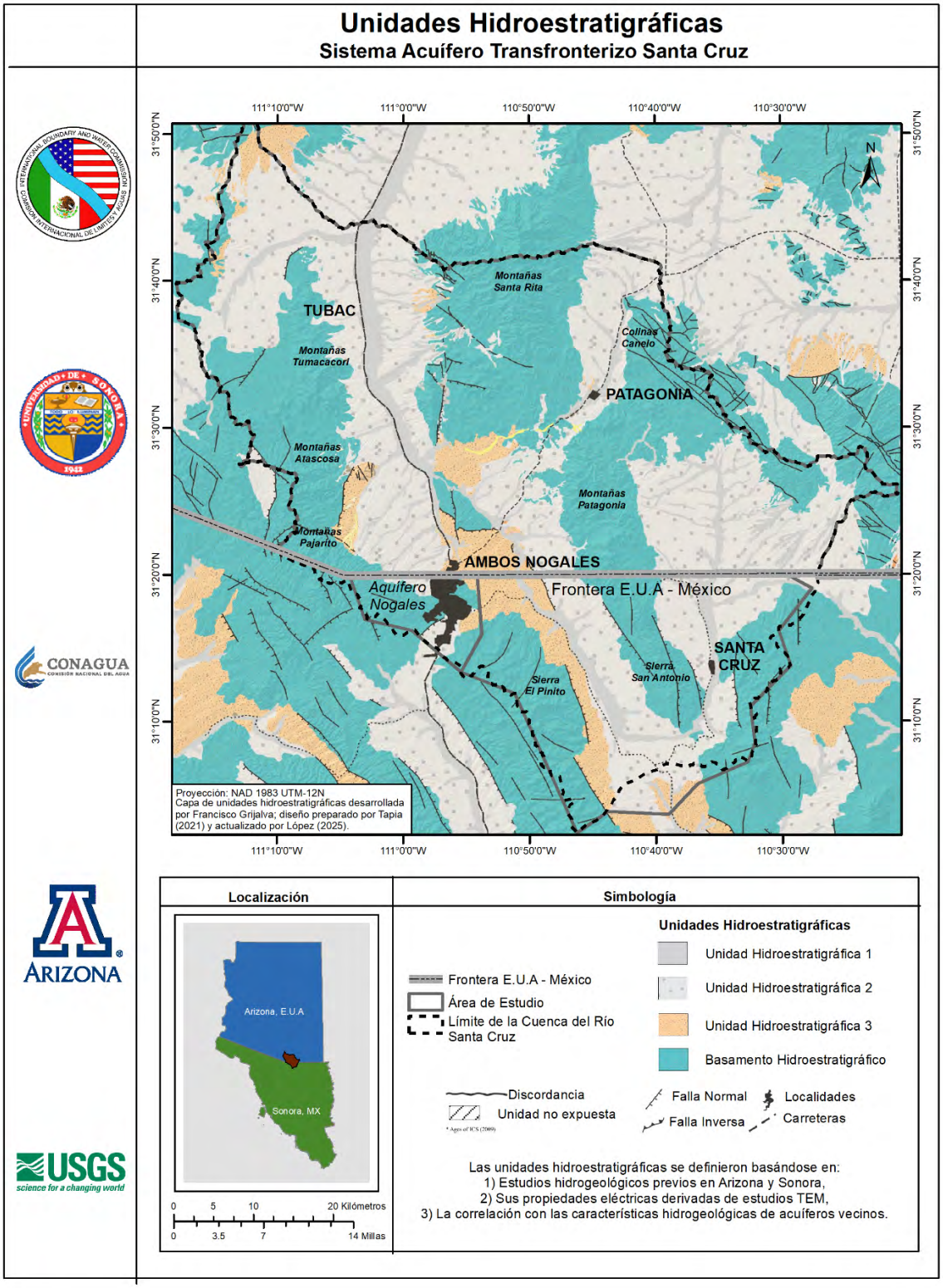


Figura 5.2 Unidades Hidroestratigráficas en el TSCAS.

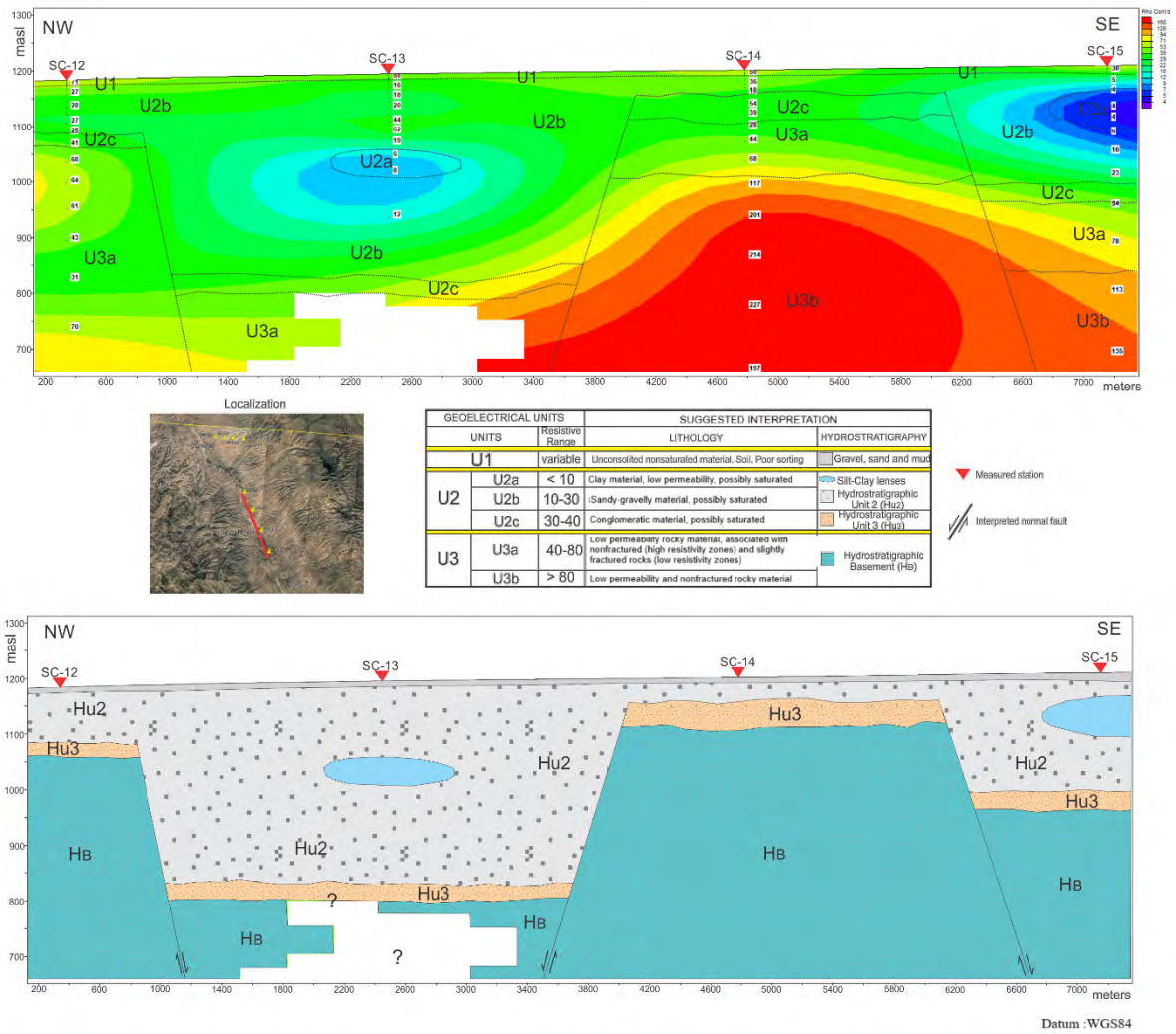


Figura 5.3 Perfil hidroestratigráfico interpretado (abajo) con base en el perfil de resistividad (arriba) en el borde suroeste de la Sierra San Antonio en el lado mexicano del TSCAS (Esto fue interpretado con base en los datos de la Figura 4.7).

El agua subterránea, los cauces de los arroyos y el agua superficial pueden interactuar de muchas maneras y, en el caso de los cauces desconectados, dicha interacción puede ser escasa o incluso nula (Winter et al., 1998). En general, las interacciones entre agua subterránea y agua superficial incluyen tramos de ganancia, secciones a lo largo del cauce del tributario, donde el agua subterránea descarga hacia el río, y tramos de perdida, secciones del cauce del tributario donde el agua del río se infiltra hacía el acuífero. Dichos patrones pueden ser afectados por la variabilidad de las características del acuífero, o la presencia de irrigación, recarga de cuencas, y pozos de bombeo o riego, así como también las condiciones climáticas a largo plazo. También es importante comprender los procesos por los cuales entra y sale el agua de los acuíferos. La recarga es el proceso por el cual el agua de la superficie se desplaza hacia un acuífero y puede cuantificarse tanto a escala local como regional. Los mecanismos de recarga son

numerosos, pero en general, la mayor parte de la recarga de los acuíferos en regiones montañosas áridas y semiáridas ocurre por medio del frente de montaña o bloque de montaña (Wilson y Guan, 2004). Sin embargo, la recarga por bloque de montaña requiere identificar la presencia de fallas, fracturas y/o zonas de cizalla suficientemente activas y alineadas para conducir el agua hacia las zonas de captación del relleno de cuenca. La remoción de agua de un acuífero, mediante procesos como evapotranspiración, descarga en cuencas de gradiente descendente y el bombeo, dependen en mayor o menor medida de las condiciones geológicas. Desde el punto de vista de la extracción por bombeo, las rocas cristalinas y las rocas sedimentarias y volcánicas del pre-terciario en el área de estudio no son la principal fuente de agua subterránea; aunque pueden ser localmente importantes para la minería y, a mayor escala, para transportar agua subterránea a acuíferos sedimentarios primarios (relleno de cuenca) en la cuenca.

Los principales acuíferos del TSCAS no están confinados, y las aguas subterráneas fluyen principalmente a través de capas no consolidadas de sedimentos gruesos (unidad hidroestratigráfica 2) y en los depósitos superficiales plio-cuaternarios asociados a terrazas y depósitos aluviales (unidad hidroestratigráfica 1). Estos acuíferos aluviales no confinados se encuentran principalmente en sedimentos de relleno de cuenca superiores asociados principalmente con facies de abanico aluvial distal y medio. Por el contrario, los acuíferos situados en los sedimentos de relleno de cuenca inferior, que tienen mayor espesor hacia el centro de la cuenca, están confinados por zonas de sedimentos finos de espesor variable (dentro de la unidad hidroestratigráfica 2). Estas zonas ricas en arcilla y limo afectan fuertemente el flujo de agua subterránea en el subsuelo, incluyendo la comunicación hidrológica entre las aguas superficiales del Río Santa Cruz y los acuíferos regionales, y son responsables de las condiciones de acuíferos semiconfinados o confinados en algunas partes del TSCAS.

Los conglomerados terciarios en la porción estadounidense del TSCAS son localmente importantes como fuente de agua subterránea (unidad hidroestratigráfica 3). Algunos pozos extraen agua de esta unidad, pero generalmente son de baja producción con un flujo mínimo. Aunque no son frecuentemente utilizadas para la perforación de pozos, las zonas de fractura de esta unidad pueden transportar localmente cantidades significativas de agua. Esto ocurre, por ejemplo, en la zona de Microcuencas donde las fracturas son un sumidero importante para la recarga de agua del aluvión del río (ADWR, 2020).

5.5. Geología Estructural

La historia tectónica desde el Fanerozoico al Cenozoico, y en menor medida la historia magmática del Mesozoico tardío al Cenozoico en el TSCAS ha dado lugar a fracturamiento y fallamiento sustancial de las unidades hidrogeológicas, las cuales son factores importantes que controlan el movimiento del agua subterránea (Drewes, 1980; Bultman y Page, 2016; Page et al., 2016a; 2016b, 2018). Estas estructuras del TSCAS tienen el potencial de ejercer controles internos sobre el agua subterránea en zonas montañosas compuestas por basamento cristalino u

otras rocas altamente impermeables, así como en sedimentos antiguos de relleno de cuenca semi-consolidados. Regionalmente penetran todas las unidades hidrogeológicas, excepto las áreas con depósitos más recientes del Neógeno tardío al Cuaternario. Los principales episodios de fallamiento y fracturamiento parecen ocurrir, de los más antiguos a los más recientes, en orientaciones discretas: 1) Un sistema NNO-SSE con la mayor continuidad longitudinal, 2) Una orientación NO-SE ocurriendo más prominentemente en Canello Hills y que aflora en el centro del TSCAS como la falla del Mt. Benedict, y 3) Estructuras de Cuencas y Valles de edad miocénica con orientación NE-SW, que definen prominentemente la cuenca del arroyo Sonoita y su canal aluvial (Drewes, 1980). Las fallas y fracturas menos penetrativas ocurren como resultado de la inyección de magma y fluidos calientes tardíos durante los eventos de mineralización hidrotermal laramídica. Estos procesos generaron fracturamiento localizado que permitió la circulación de fluidos y gases ricos en metales, los cuales depositaron abundantes minerales en las zonas altas del centro y norte de las Montañas Patagonia y en el sur de las Montañas Santa Rita dentro del área del TSCAS. Estas características estructurales pueden influir en el movimiento del agua subterránea creando trayectorias preferenciales o barreras dentro de las unidades hidroestratigráficas.

5.6. Conclusiones

Este estudio describe el entorno hidrogeológico del TSCAS basado en estudios hidrogeológicos y geofísicos previos para los estados de Arizona y Sonora, junto con la información disponible para los acuíferos vecinos. De acuerdo con la información recabada, fue posible separar tres unidades hidroestratigráficas: la Unidad 1 (~10-45 m de espesor) está formada por materiales no consolidados como grava, arena y lodo; la Unidad 2 (~250-350 m de espesor) está formada por arcillas, gravas arenosas y materiales conglomeráticos, también incluye cuerpos lenticulares (limo y arcilla) que pueden crear condiciones de confinamiento locales; y la Unidad 3 (espesor no definido), contiene acuíferos de rocas fracturadas que incluyen las Formaciones Nogales y Báucarit. Debajo de estas tres unidades hidrogeológicas se encuentra un complejo cristalino de baja permeabilidad compuesto por rocas volcano-sedimentarias y sedimentarias del Paleozoico al Mesozoico, cubiertas e intrusionadas por rocas graníticas del Jurásico y Terciario, así como por otras rocas volcánicas más jóvenes, categorizadas como el basamento hidroestratigráfico. Estudios geofísicos binacionales adicionales podrían mejorar y refinar la comprensión de la distribución temporal y espacial del agua y los materiales geológicos que componen las unidades hidrogeológicas. Adicionalmente, estudios hidrogeoquímicos e isotópicos podrían contribuir al análisis del origen del agua, permitiendo comprender su composición y edad, así como identificar potenciales interacciones agua-roca, y trayectorias de flujo del agua subterránea a diferentes escalas. Estos análisis podrían ayudar a determinar las zonas de recarga y descarga del acuífero. Estudios adicionales de la Formación Báucarit (parte de la Unidad Hidroestratigráfica 3), podrían identificar áreas de fracturas persistentes que puedan favorecer

la circulación del agua subterránea y la conectividad entre los acuíferos aluviales y rocosos.

Bibliografía

Anning, D.W. y Leenhouts, J.M., 2010, Conceptual Understanding and Groundwater Quality of the Basin-Fill Aquifer in the Upper Santa Cruz Basin, Arizona, in Thiros, S.A., Bexfield, L.M., Anning, D.W,and Huntington, J.M (eds), Conceptual Understanding and Groundwater Quality of Selected Basin-Fill Aquifers in the Southwestern United States: USGS Professional Paper 1781, págs. 123-144.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2020, Groundwater Flow Model of the Santa Cruz Active Management Area along the Santa Cruz River and Nogales Wash from the International Border to Tubac (Septiembre, 2020). Consultado el 27 de marzo de 2025 at https://www.azwater.gov/hydrology/field-services/hydrology-publications-and-data.

Bultman, M., Page, W., Bedrock morphology and structure, upper Santa Cruz Basin, south-central Arizona, with transient electromagnetic survey data, U.S. Geological Survey Open File Report 2016-1152, https://doi.org/10.3133/ofr20161152.

Coes, A.L., Gellenbeck, D.J., Towne, D.C., y Freark, M.C., 2000, Calidad del agua subterránea en la cuenca alta de Santa Cruz, Arizona, 1998: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00–4117, 55 p.

Culberston, Chris, Lytle, W.E., McMillan, M.M., Sternberg, B.K., y Witheres, K.B., 2010, Investigación electromagnética transitoria de la morfología de microcuencas a lo largo del río Santa Cruz, Nogales, Arizona: Geophysics Field Camp, 11 de mayo de 2010, Universidad de Arizona, 117 p.

Davidson, E.S., 1973, Geohydrology and water resources of the Tucson Basin, Arizona: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1939-E, 81 p.

Drewes, H., 1980, Tectonic map of southeast Arizona, U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Map I-1109, scale 1:125,000, digitized in 2022 and accessed 9/15/2025 at: https://doi.org/10.3133/i1109.

Fenneman, N.M., 1931, Physiography of western United States: MCGraw-Hill, Nueva York, 534 pp.

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024a, Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Río Santa Cruz (2615) Río Santa Cruz, Estado de Sonora.

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024b, Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Nogales (2650) Río Santa Cruz, Estado de Sonora.

IDEAS, 2008, Estudio Regional de Evaluación Hidrogeológica del Acuífero Santa Cruz, Municipios Santa Cruz y Nogales, Sonora. Para Stingray Copper Inc. Inedit.

Maxey G.B., 1964, Unidades hidroestratigráficas: Journal of Hydrology, 2, 124-129.

Minjarez Sosa, I., Monreal Saavedra, R., Grijalva Noriega, F.J., Ochoa Granillo, J.A., Tapia Villaseñor, E.M., Rangel Medina, M., Montijo González, A., 2011. Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Río Santa Cruz, Estado de Sonora, Primera Etapa. Hermosillo, Sonora.

Nelson, K.M., 2007, Modelo de flujo de agua subterránea del área de manejo activa de Santa Cruz a lo largo del río Santa Cruz dominado por efluentes, condados de Santa Cruz y Pima, Arizona. División de Hidrología, Departamento de Recursos Hídricos de Arizona. Informe de Modelado No. 14, 154 p.

Page, W.R., Bultman, M.W., VanSistine, D.P., Menges, C.M., Gray, F., y Pantea, M.P., 2018, Geologic framework and hydrogeology of the Rio Rico and Nogales 7.5' quadrangles, upper Santa Cruz Basin, Arizona, with three-dimensional hydrogeologic model: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2018–5062, 34 p.

Page, W.R., Gray, F., Bultman, M.W. y Menges, C.M., 2016b, Investigaciones hidrogeológicas de la Formación Nogales del Mioceno en el área de Nogales, cuenca alta de Santa Cruz: Informe de investigaciones científicas del Servicio Geológico de los Estados Unidos 2016–5087

Page, W.R., Menges, C.M., Gray, F., Berry, M.E., Bultman, M.W., Cosca, M.A., y VanSistine, D.P., 2016a, Mapa geológico de los cuadrángulos de Río Rico y Nogales 7.5', Condado de Santa Cruz, Arizona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3354, 32 p. panfleto, appendix, 2 hojas, escala 1:24,000.

Pool. D. R., Dickinson, J. E., 2007, Modelo de flujo de agua subterránea de las porciones de Sierra Vista Subwatershed y Sonoran de la cuenca alta de San Pedro, sureste de Arizona, Estados Unidos, y norte de Sonora, México: U. S. Geological Survey, EE. UU., Estados Unidos

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., y Alley, W.M., 1998, Ground water and surface water—A single resource: U.S. Geological Survey Circular 1139, 79 p.

6. PIEZOMETRÍA Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS

6.1. Introducción y Métodos

El objetivo de este capítulo es revisar la información y publicaciones existentes relacionados con datos piezométricos (niveles o presión del agua) y parámetros hidráulicos (transmisividad, conductividad hidráulica o coeficiente de almacenamiento) con la finalidad de comprender el comportamiento de las aguas subterráneas del TSCAS. La información piezométrica y parámetros hidráulicos se utiliza para calcular estimaciones del almacenamiento y flujo de agua subterránea. Esto representa la siguiente etapa del análisis hidrogeológico después de la interpretación de información (ver Capítulo 5). El flujo de agua subterránea (o más precisamente "el flujo") se puede estimar de diversas maneras según el tipo de flujo, pero todos, excepto el bombeo y la lluvia, requieren información sobre los gradientes de presión del agua y la transmisividad o conductividad hidráulica. Este capítulo presenta información sobre los niveles y extracciones de agua subterránea tanto en Estados Unidos como en México. También se describe el comportamiento piezométrico del TSCAS y se incluye un resumen de los parámetros hidráulicos de la región, como la transmisividad y la conductividad hidráulica.

En México, la Ley de Aguas Nacionales (LAN) establece los tipos de concesiones y asignaciones de agua (Cruz-Ayala y Megdal, 2020). La LAN ordena que "la explotación, aprovechamiento o aprovechamiento no consuntivo de los recursos hídricos de la nación deberá realizarse mediante una concesión o asignación otorgada por el Poder Ejecutivo Federal o los Consejos de Cuenca" (LAN, 1992, última reforma 2025). Una concesión es el título oficial otorgado por la CONAGUA a personas o entidades legales, que permite el uso y extracción de agua subterránea hasta un determinado volumen para un propósito definido y por un periodo de tiempo determinado. *Asignación* es el término legal que la legislación mexicana establece para los derechos de aprovechamiento de agua otorgados principalmente a entidades públicas para fines de uso público, incluyendo el abastecimiento de agua urbana y doméstica. A diferencia de las concesiones, las *asignaciones* no pueden transferirse a otros usuarios (Cruz-Ayala y Tortajada, 2022). Las concesiones y *asignaciones* se encuentran inscritas en el Registro Público de Derechos de Agua (CONAGUA-REPDA, 2022).

Una porción del Acuífero Río Santa Cruz en Sonora (SCRAS) está sujeta a ciertas prohibiciones respecto al desarrollo de nuevos pozos por tiempo indefinido. La prohibición forma parte de un decreto de veda publicado en el Diario Oficial de la Federación en 1961 "Decreto que establece una veda por tiempo indefinido para la extracción de aguas subterráneas en la Cuenca del Río Santa Cruz, en los municipios de Nogales y Santa Cruz, Sonora," (DOF, 2015). Otra porción del acuífero se rige por un decreto de 1978 "Meridiano 110", que estableció la conservación y manejo de los recursos de agua subterránea en los acuíferos sonorenses para el bien público (DOF, 1978). Ambos decretos permiten extracciones limitadas para fines domésticos, industriales y de riego (Minjarez et al., 2011). El área

de manejo Activa de Santa Cruz (SCAMA) es un área regulada por ADWR con el objetivo establecido de mantener condiciones de rendimiento seguras y evitar que los niveles freáticos locales experimenten disminuciones a largo plazo (ADWR, 2021).

6.2. Inventario de Pozos y Datos del Nivel Freático

El TSCAS comprende aproximadamente 522 pozos con al menos un registro de profundidad al nivel freático en décadas recientes, listados en múltiples fuentes de datos (Figura 6.1). En la porción de Arizona, existen alrededor de 960 pozos en el Groundwater Site Inventory (GWSI) del Arizona Department of Water Resources (ADWR), de los cuales 401 cuentan con al menos una observación del nivel de agua subterránea desde el año 2000. En la porción mexicana, la base de datos REPDA incluye 276 pozos registrados, de los cuales 226 se encuentran en el acuífero Río Santa Cruz y 50 en el acuífero Nogales, sin embargo, los datos de niveles de agua subterránea están disponibles únicamente para 71 pozos, de los cuales 26 fueron medidos por Minjarez et al. (2011) y 45 corresponden a mediciones realizadas por CONAGUA. La distribución de estos pozos se muestra en la Figura 6.1.

En la porción de Estados Unidos, la mayoría de los pozos están ubicados a lo largo de los principales ríos y arroyos de la cuenca: el Río Santa Cruz, el arroyo Sonoita, el arroyo Nogales y el arroyo Sopori. Muchos de estos pozos tienen registros publicados (ADWR, 2025a) que contienen información sobre la profundidad total, el material de revestimiento y la profundidad del intervalo ranurado, así como una base de datos de mediciones del nivel estático (ADWR, 2025b). En el Acuífero Santa Cruz en Arizona (SCAA), dependiendo de la región administrativa, entre el 20 y el 50 por ciento de los pozos cuentan con registros litológicos. La base de datos de ADWR (GWSI) contiene información sobre los niveles de agua subterránea recolectados por múltiples entidades, incluyendo los datos recopilados por ADWR en “pozos índice”, a menudo instrumentados con dispositivos de registro continuo.

En la porción mexicana, el reporte de la CONAGUA-REPDA (2022) indica que había 248 pozos a partir de 2022, principalmente distribuidos a lo largo del canal del Río Santa Cruz (Figura 6.1). El reporte también incluye información sobre 53 pozos dentro del Sistema Acuífero Nogales (NAS). La Figura 6.2 muestra la ubicación de los pozos utilizados para crear hidrogramas de los niveles de agua subterránea en el SCAMA y el SCRAS. Los pozos utilizados para crear los hidrogramas en la Figura 6.3 se seleccionaron manualmente para capturar tendencias espaciales y temporales a lo largo del SCAMA y del SCRAS. Todos los pozos reportados para la parte estadounidense del TSCAS se tomaron de la base de datos GWSI (ADWR, 2025a). La información de pozos para SCRAS y NAS se obtuvo de CONAGUA-REPDA (2024). En México, el volumen real de extracción de agua subterránea a menudo no es monitoreado por la CONAGUA y, por lo tanto, puede desviarse de los volúmenes autorizados por el REPDA (Tapia-Villaseñor et al., 2022).

Para el SCRAS y NAS encontramos siete usos registrados: doméstico, municipal (público-urbano en México), abrevadero, agrícola, servicios, no

determinado/desconocido e industrial. Aunque existen similitudes entre el uso doméstico y el urbano-público, hay diferencias importantes entre ellos. El uso doméstico se asocia con el agua se utiliza para el riego de plantas, viviendas y residencias privadas y fincas de autoconsumo. Generalmente, está autorizado para comunidades rurales que carecen de infraestructura para proveer agua potable. En el uso público-urbano, el agua se dedica a prestar el servicio en ciudades o núcleos de población.

Para la SCAMA presentamos información para usos municipales, pozos domésticos, industriales y agrícolas. El uso municipal incluye el agua utilizada en una ciudad, pueblo, compañía privada o distrito de riego que suministra agua para uso no relacionado con el riego. Los pozos domésticos son pequeños pozos que no son de riego y que normalmente se utilizan para proporcionar agua para fines domésticos a los hogares que no cuentan con acceso a las redes municipales de abastecimiento.

6.3. Extracción de Agua Subterránea

La extracción de agua del TSCAS comenzó a principios de 1900, pero los datos son limitados e insuficientes para reconstruir adecuadamente la historia del bombeo de la primera mitad del siglo. Sin embargo, Nelson (2007) estimó que la tasa máxima de bombeo en el SCAMA durante la mitad del siglo XX de todos los pozos combinados fue de alrededor de 25 millones de metros cúbicos al año (Mm^3/año). Se informó que la tasa de bombeo en pozos de baja capacidad era de alrededor de 18.5 Mm^3/año, de los cuales el 60% se destinaba a uso agrícola. También hay datos históricos sobre extracciones del aluvión del Río Santa Cruz reportados por la ciudad de Nogales, Arizona a ADWR (Nelson, 2007). Estos datos inician en 1941 con una tasa de bombeo de aproximadamente 0.62 Mm^3/año, aumentando a más de 3.0 Mm^3/año entre 1977 y 1983 (Nelson, 2007). En las partes de mayor elevación del SCAA como el Valle de San Rafael y la cuenca superior del arroyo Sonoita (Figura 6.3), los datos sobre los cambios y las magnitudes del bombeo de agua subterránea son escasos, pero es probable que los volúmenes de bombeo anual hayan tenido un efecto mínimo en los niveles de agua subterránea y la captura de agua superficial.

El uso del agua en el SCAMA durante el período 1985-2017 estuvo dominado por la agricultura y los usuarios municipales. El consumo agrícola ha incrementado a través del tiempo, de aproximadamente 1 Mm^3/año en 1997 a aproximadamente 9 Mm^3/año para 2020 (Figura 6.4, ADWR 2012). Los usos industriales también comenzaron en 2011, incrementando los volúmenes generales de extracción de agua subterránea juntos con los usos agrícolas. Nelson (2007), examinó los informes anuales de 1997-2002 de los pozos no exentos de la región para estimar una extracción anual promedio de 19.49 Mm^3/año. Los pozos no exentos en el SCAMA representan alrededor del 95% de las extracciones de la región. Aproximadamente el 60% del bombeo ocurre durante el verano (mayo-septiembre) y el 40% en invierno (octubre-abril). ADWR (2012) proyectó que la demanda de agua subterránea en el área de estudio aumentará gradualmente de ~20.97 Mm^3/año en 2006 a ~28.37 Mm^3/año en 2025, principalmente debido a un aumento en la demanda municipal. Las extracciones

de aguas subterráneas en 2023, como se informa en ADWR (2024), alcanzaron 17.059 Mm^3 /año (Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Extracciones anuales del Área de Maneja Activo de Santa Cruz para el año 2023, en Mm3 (ADWR, 2024).

Uso	Extracción de aguas subterráneas (2023)
Municipal	7.581
Industrial	1.259
Agrícola	8.219
Total	17.059

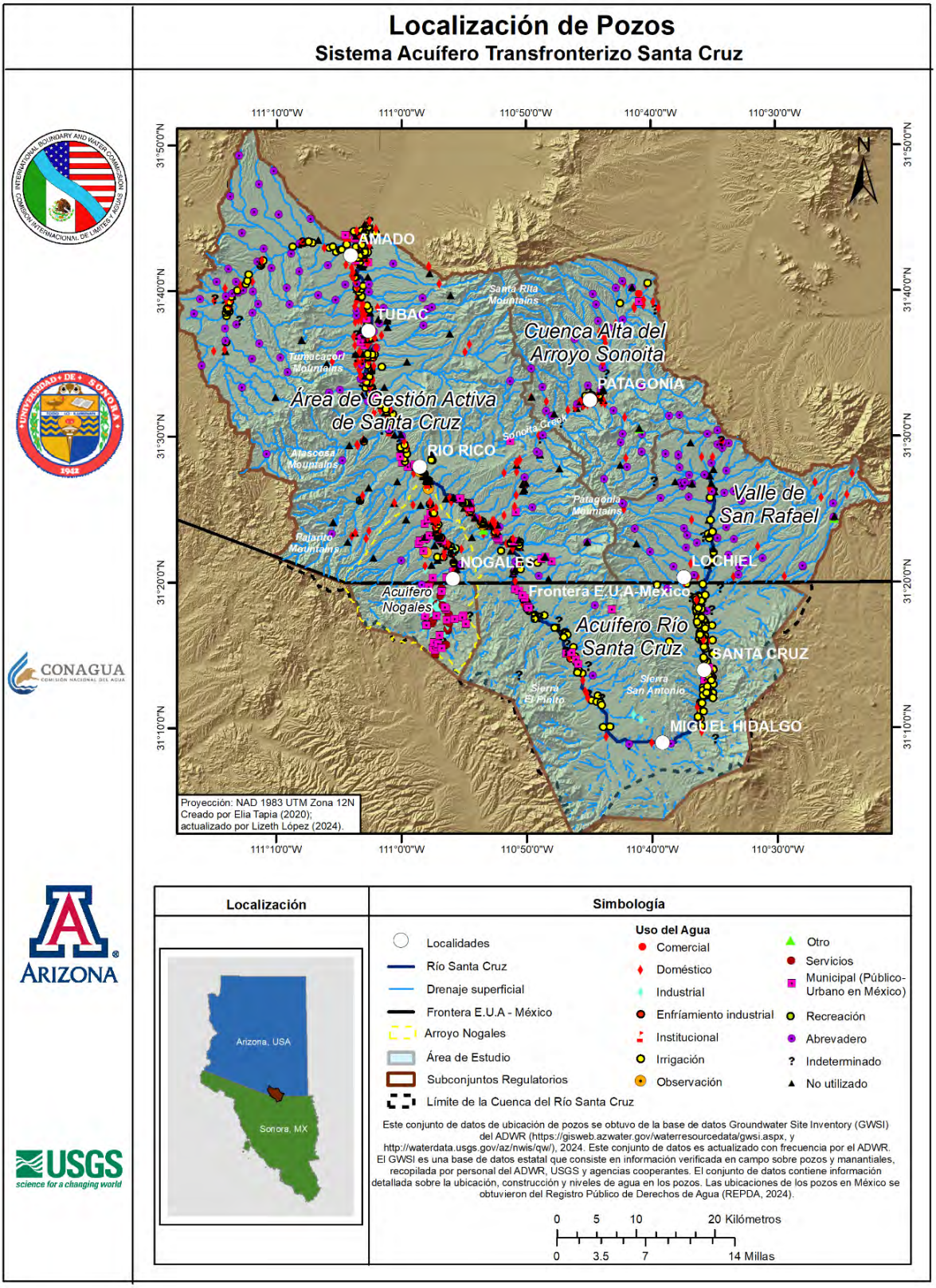


Figura 6.1 Ubicación de Pozos en el TSCAS.

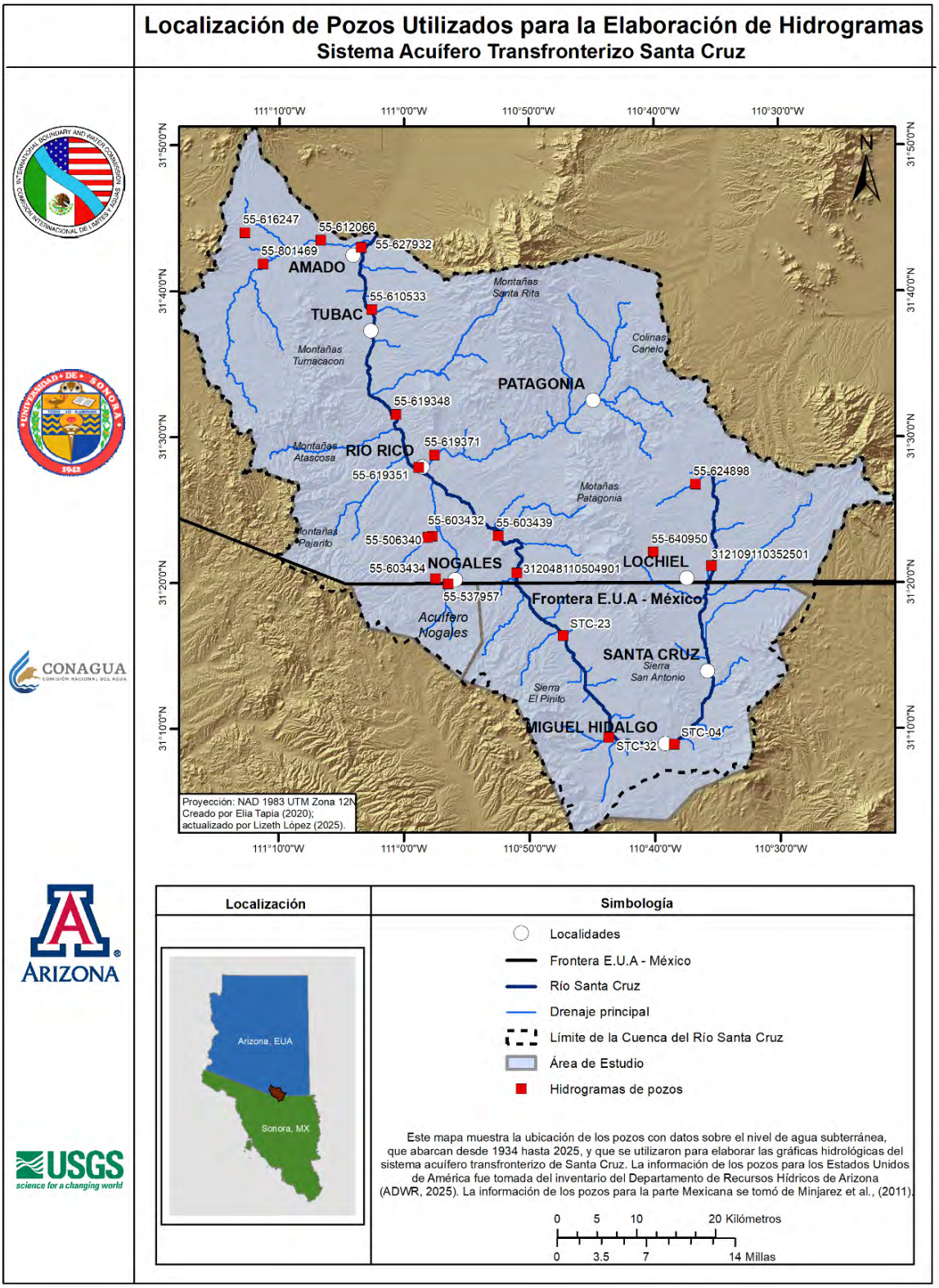
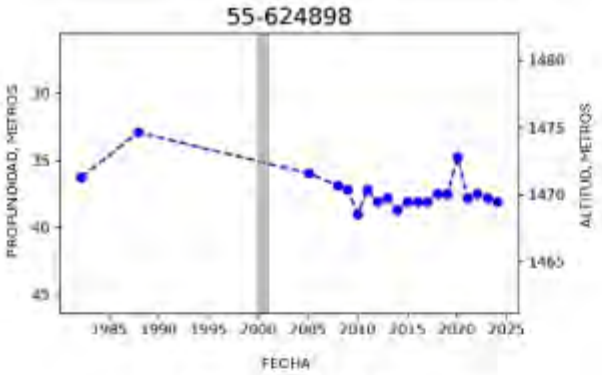
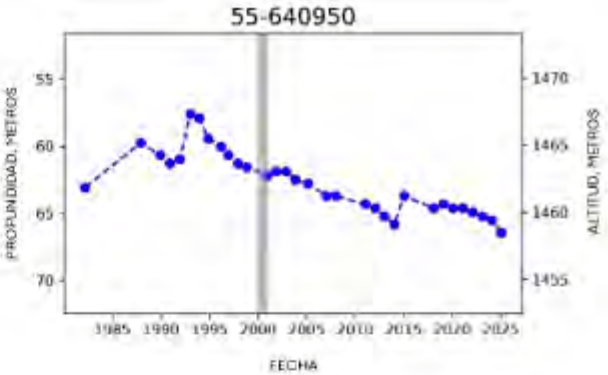
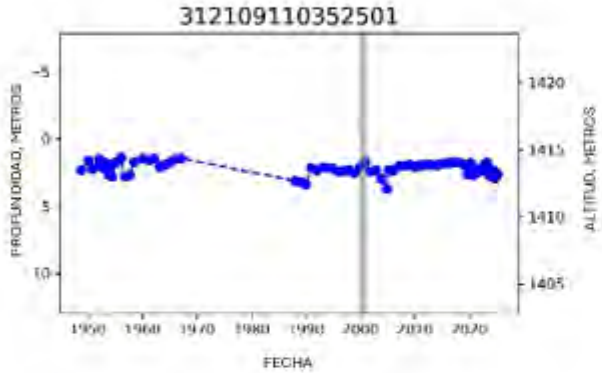
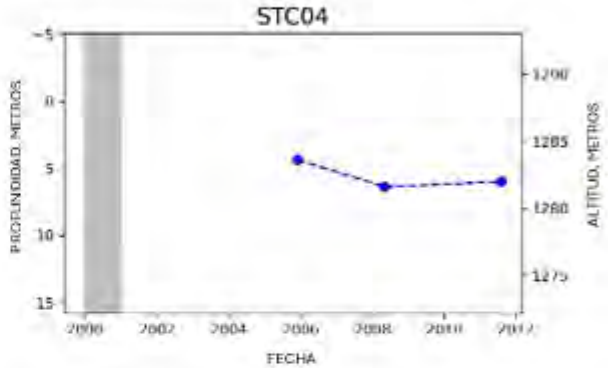


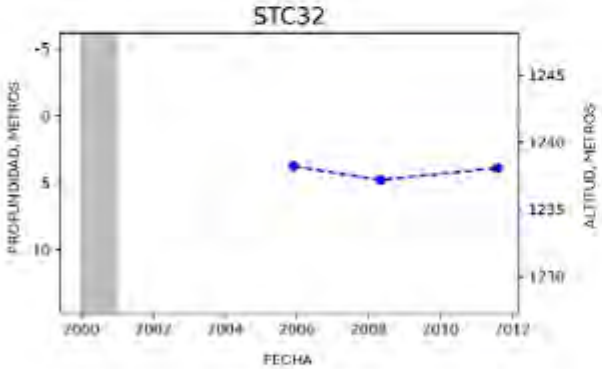
Figura 6.2 Ubicación de los pozos utilizados para los hidrogramas de aguas subterráneas en el TSCAS.

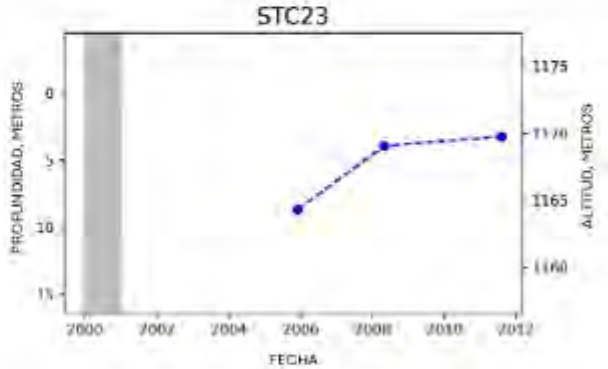

55-624898
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

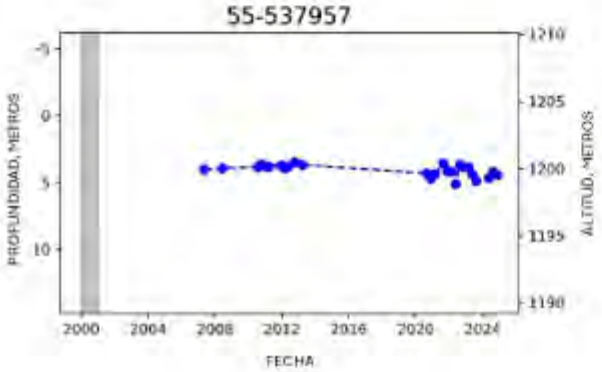

55-640950
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

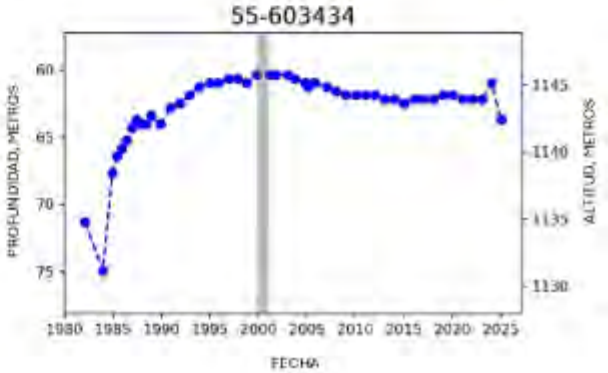

312109110352501
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

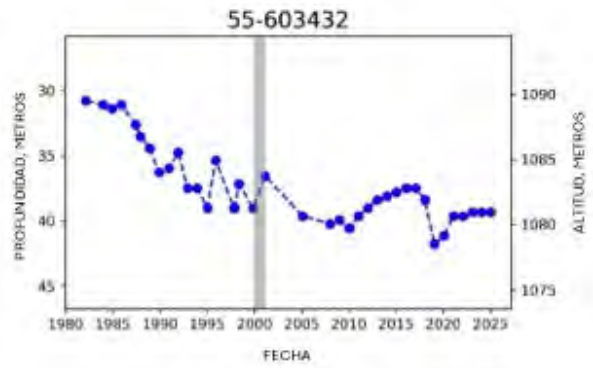

STC04
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

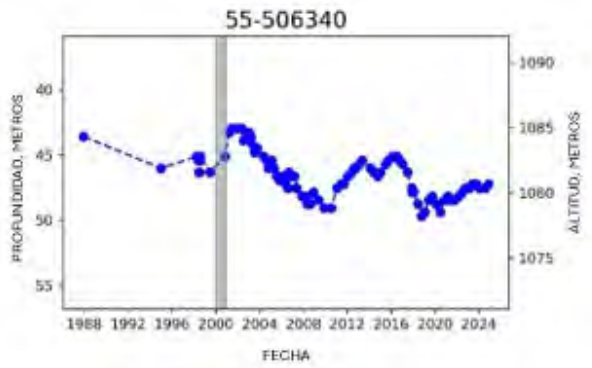

STC32
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

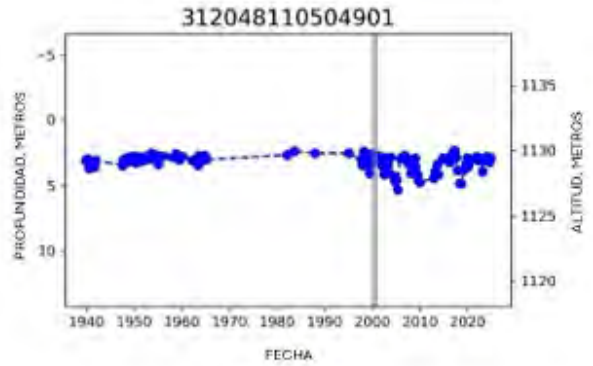

STC23
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

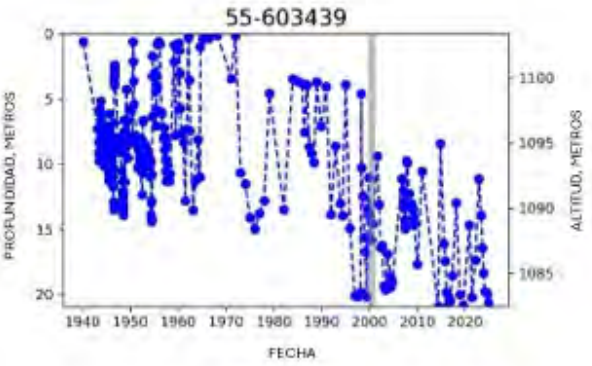

55-537957
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

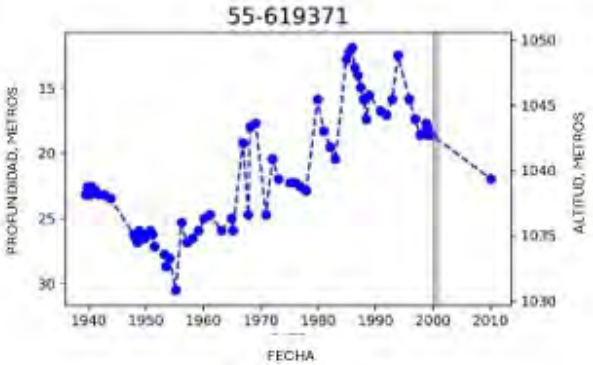

55-603434
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

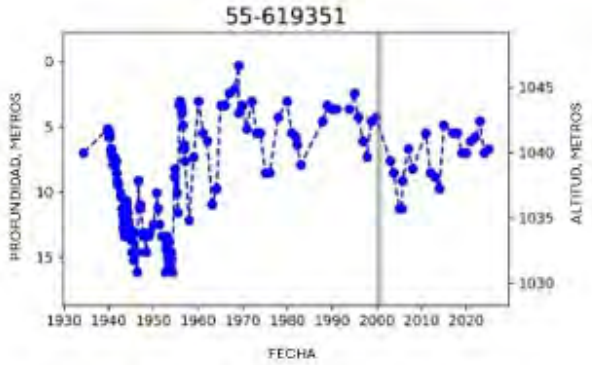

55-603432
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

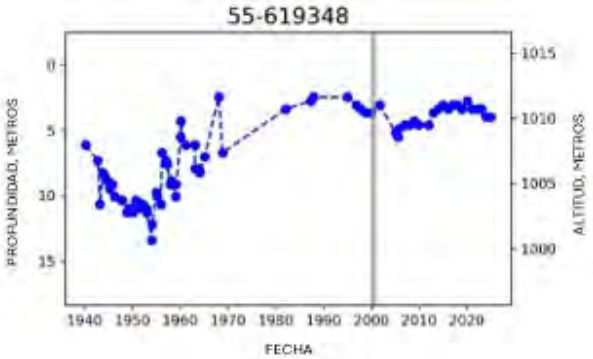

55-506340
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

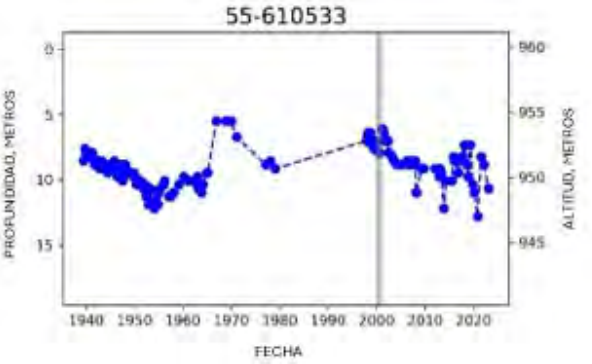

312048110504901
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA


55-603439
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA


55-619371
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA


55-619351
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA


55-619348
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA


55-610533
PROFUNDIDAD, METROS
ALTITUD, METROS
FECHA

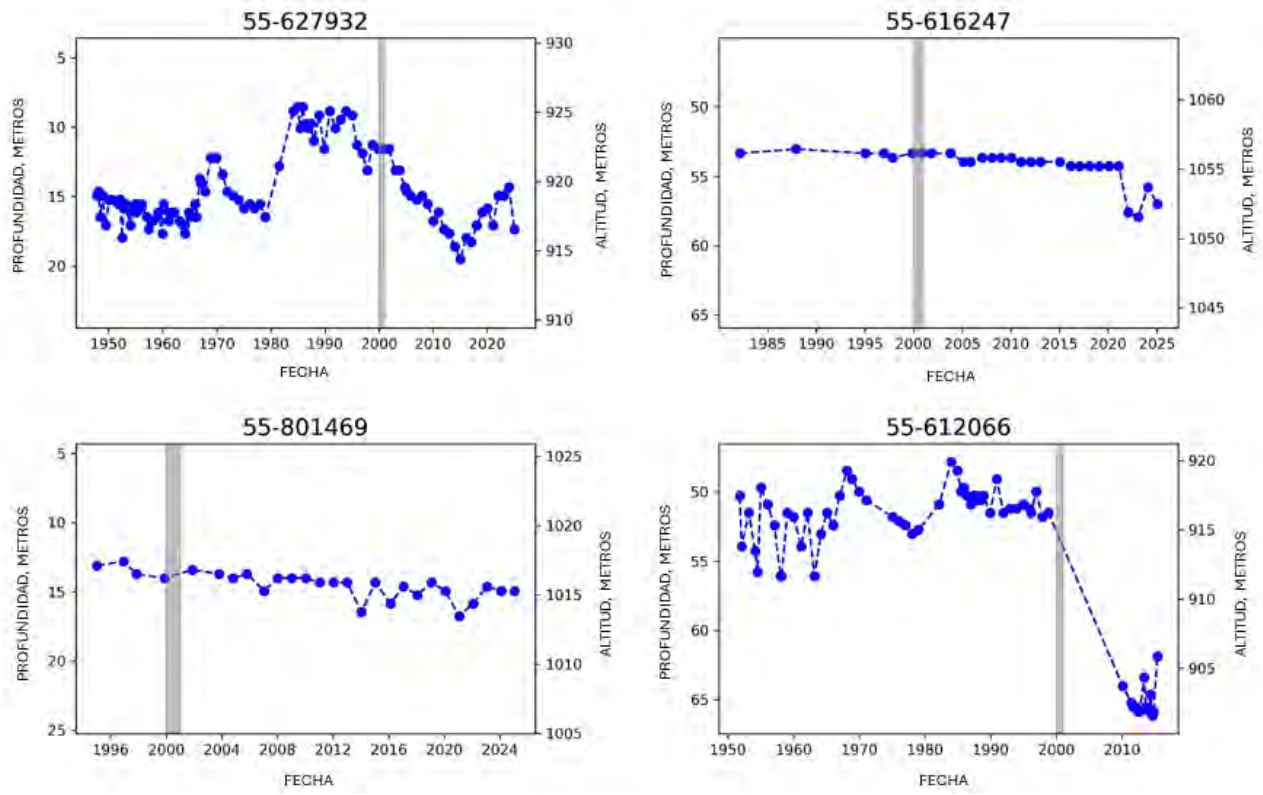


Figura 6.3 Hidrogramas para pozos seleccionados en el TSCAS, mostrando profundidad del agua subterránea en metros en el eje izquierdo, y altitud en metros (NAD27) en el eje derecho (ADWR, 2025a) y Minjarez et al., (2011).

La barra gris indica el año 2000, para dar sentido de la escala de tiempo, y el eje y abarcan una magnitud de cambio idéntica en todas las gráficas (20 m). Las gráficas correspondientes a los pozos de Estados Unidos están tituladas con su número de pozo ADWR Well 55 o su número ADWR GWSI. Las líneas punteadas indican periodos sin información y no deberían ser utilizados para interpolar o estimar valores actuales.

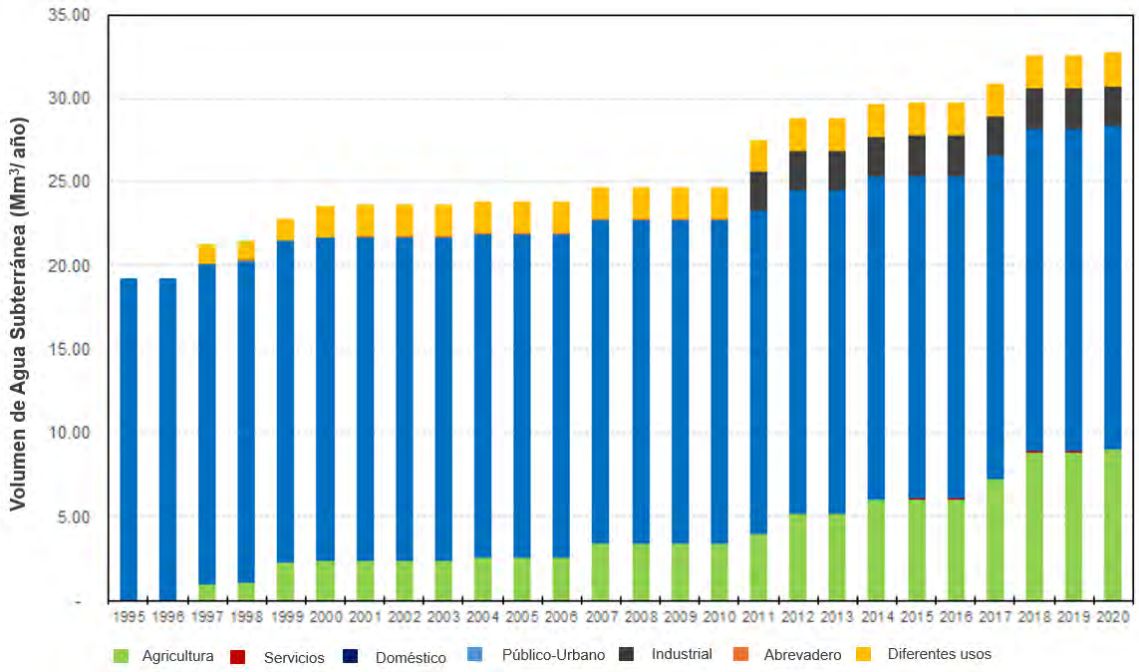


Figura 6.4 Extracciones anuales de agua subterránea entre 1985 y 2020 en el SCAMA (ADWR, 2020).

En la porción mexicana del área de estudio, existen dos fuentes principales de información sobre aguas subterráneas: el REPDA y el Organismo Operador Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Nogales, OOMAPAS. Los volúmenes y porcentajes de extracciones de agua subterránea presentados en este reporte se obtuvieron analizando los pozos REPDA disponibles (utilizando SIG).

El SCRAS tienen un volumen de concesión anual de alrededor de 2.20 Mm^3/año (GAS-CONAGUA, 2024a), mientras que en el NAS hay un déficit de -0.86 Mm^3/año. En el SCRAS, el volumen de extracción de agua subterránea ha aumentado de 19.2 Mm^3/año en 1995 a 33.9 Mm^3/año en 2020 (Figura 6.5). Este aumento se atribuye principalmente a las concesiones para la agricultura, de 0 en 1995 a aproximadamente 8.13 Mm^3/año en 2020. El volumen de extracción de agua subterránea en el NAS reportado por el REPDA es de 2.4 Mm^3/año (GAS-CONAGUA, 2024b), y los volúmenes a través del tiempo se muestran en la Figura 6.6 y Figura 6.7, mostrando la demanda combinada en el TSCAS. Tabla 6.2 y Tabla 6.3 presentan un resumen de SCRAS y NAS, respectivamente. Sólo se consideraron los pozos que interceptaron el SCRAS y el NAS. Las extracciones para fines municipales (públicos urbanos) representan el uso primario de agua subterránea en el SCRAS (alrededor del 68.5% del volumen total de concesiones), seguido de usos agrícolas (30.8%) y abrevadero (0.53%) (Figura 6.9). En las NAS, el uso principal es industrial (89% del total del volumen concesionado), seguido de servicios (5.4%), usos diversos (1.2%) y otros usos menores (Figura 6.10).

Tabla 6.2 Volumen de concesiones y asignaciones del SCRAS en Mm^3 para el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024a).

Uso de aguas subterráneas	Volumen de la Concesión (Mm^3)
Agrícola	8.13
Doméstico	0.04
Municipal (Público-urbano)	18.09
Total	26.4

Tabla 6.3 Volumen de concesiones y asignaciones del NAS en Mm3 para el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024b).

Uso de aguas subterráneas	Volumen de Concesión 2022 (Mm^3)
Diferentes usos	0.01
Doméstico	0.00007
Industrial	0.73
Municipal (Público-urbano)	0.008
Abrevadero	0.03
Servicios	0.044
Total	0.82

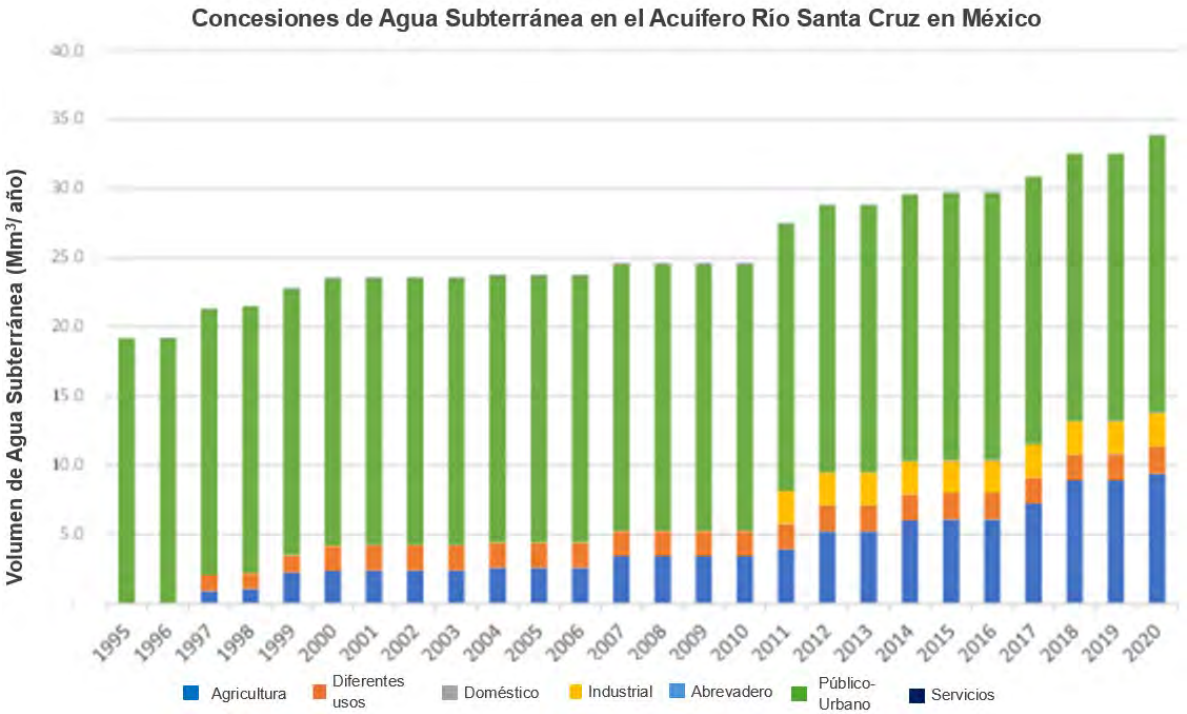


Figura 6.5 Concesiones y *asignaciones* anuales de aguas subterráneas entre 1995 y 2020 en el SCRAS en México (Fuente: CONAGUA-REPDA, 2022) (Tapia-Villaseñor et al., 2022).

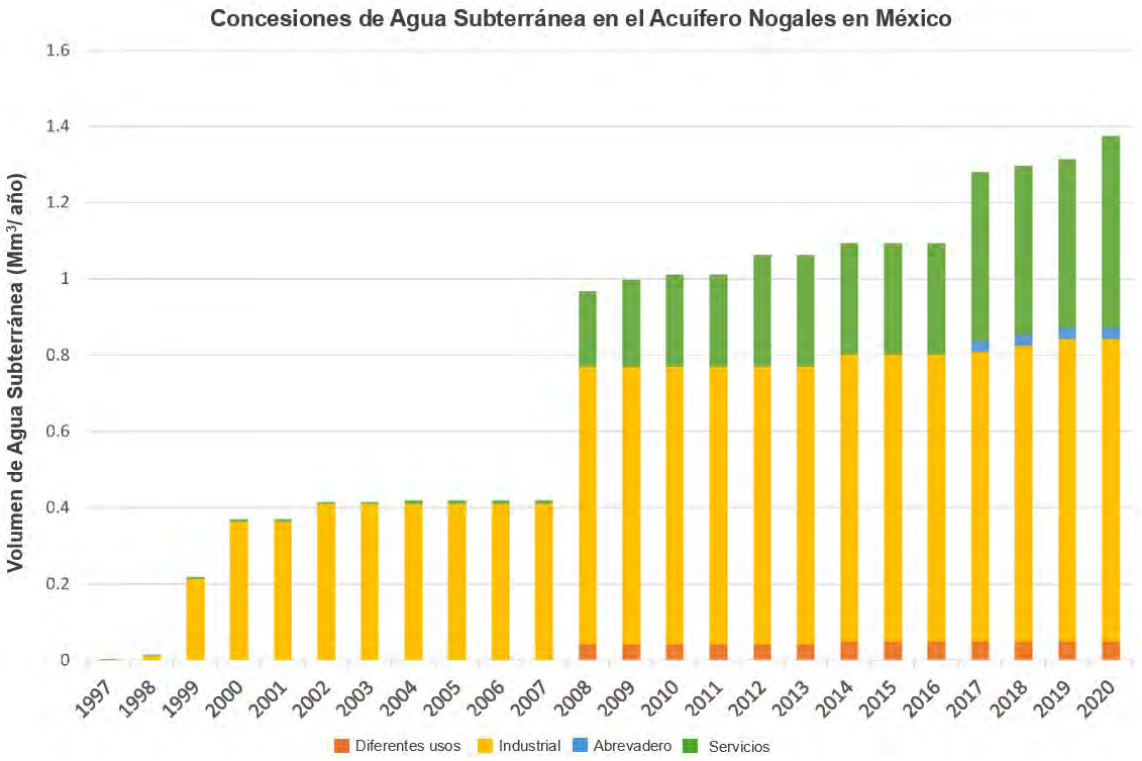


Figura 6.6 Concesiones y asignaciones anuales de agua subterránea entre 1997 y 2020 en el NAS en México (Fuente: CONAGUA-REPDA, 2022) (Tapia-Villaseñor et al., 2022).

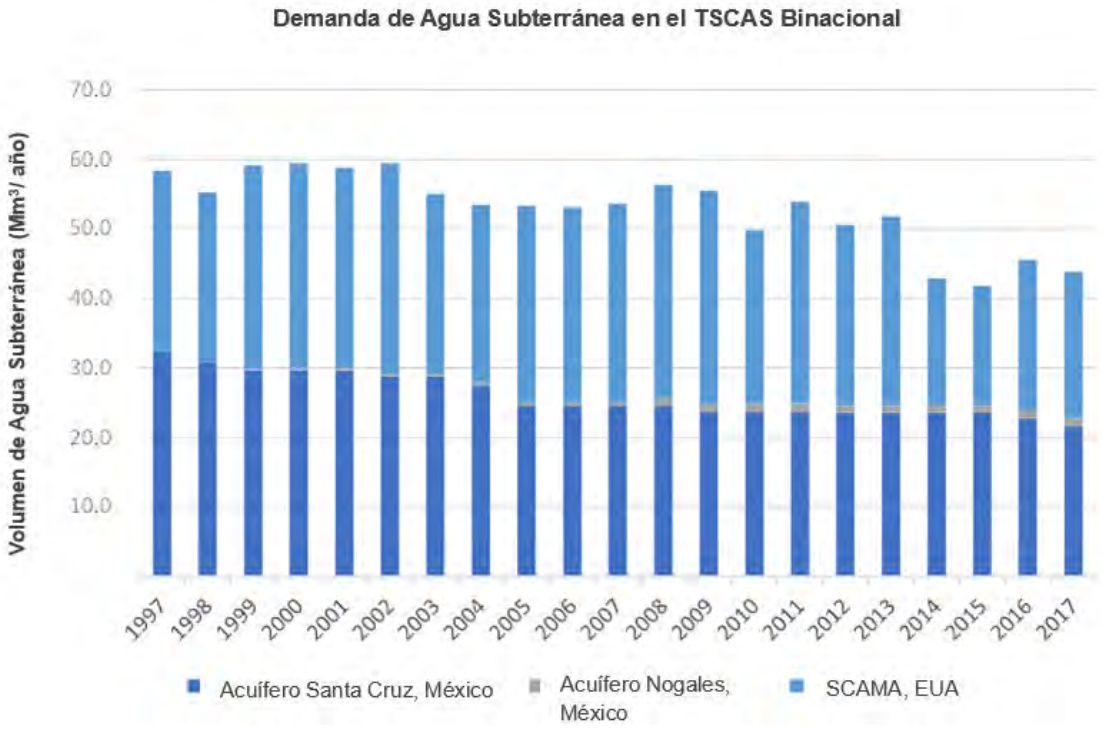


Figura 6.7 Extracción anual de agua subterránea en el TSCAS en México y Estados Unidos.

Figura 6.8 Extracción de agua subterránea y usos en el SCAMA en los Estados Unidos para el año 2023 (ADWR, 2024).

Figura 6.9 Extracción de agua subterránea y usos en el SCRAS en México en el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024a).

Figura 6.10 Extracción de agua subterránea y usos en el NAS en México en el año 2022 (GAS-CONAGUA, 2024b).

La ciudad de Nogales, Sonora, depende de transferencias físicas de agua potable y aguas residuales tanto del Acuífero Los Alisos como del acuífero Río Santa Cruz. Estas transferencias provienen de tres acuíferos diferentes y son necesarias para sostener la demanda de agua subterránea (Tapia-Villaseñor et al., 2020). De acuerdo con OOMAPAS (comunicación escrita, 2025), la extracción total que abastece la ciudad de Nogales se deriva de tres fuentes primarias: el acuífero Río Santa Cruz (8.86 Mm^3/año), la ciudad de Nogales (7.88 Mm^3/año), y el acuífero Los Alisos (9.78 Mm^3/año) (Tabla 6.4). Las aguas residuales generadas en Ambos Nogales se transfieren a plantas de tratamiento en Los Alisos, México y el SCAMA, en Estados Unidos, donde son tratadas y descargadas hacia canales existentes que contribuyen a la recarga de agua subterránea de la región. Sin embargo, el volumen, la temporalidad y la confiabilidad de las transferencias de aguas residuales están influenciados por las estructuras de gobernanza del agua en México y por los acuerdos binacionales entre Estados Unidos y México (Tapia-Villaseñor et al., 2020). Las condiciones de infraestructura también influyen en las transferencias de agua y aguas residuales. Por ejemplo, en 2018, una falla en el cárcamo de bombeo de aguas residuales en México redujo los caudales de entrada a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Alisos (PTAR), por lo que el volumen restante de aguas residuales fue desviado hacia la

PITAR en el SCAMA (OOMAPAS, 2018, comunicación oral; Tapia-Villaseñor et al., 2020).

Tabla 6.4 Volumen de agua utilizado por el subsistema de agua potable de la ciudad de Nogales, Sonora (OOMAPAS, 2025, comunicación escrita).

Fuente	Volumen
Acuífero Río Santa Cruz	8.86 Mm^3/año (281 litros por segundo [L/s])
Ciudad de Nogales (Acuífero Nogales)	7.88 Mm^3/año (250 L/s)
Acuífero Los Alisos	9.78 Mm^3/año (310 L/s)
Total	26.52 Mm^3/año (841 L/s)

6.4. Análisis del Comportamiento Piezométrico

Existe poca información sobre el comportamiento del sistema de agua subterránea en el Valle de San Rafael y la cuenca superior del arroyo Sonoita, pero los pozos índices del ADWR en esos lugares indican descensos lentos en las últimas décadas (ADWR, 2022b). En Nogales, Sonora, CONAGUA (2024b) informó cambios en la profundidad del nivel estático de 17 pozos entre 1994 y 2005, encontrando que la mayoría de los niveles de agua variaban alrededor de un metro. Durante este período, la profundidad del nivel de agua subterránea aumentó más de 5 m solo en dos pozos, uno ubicado en la parte noroeste de la ciudad, donde el nivel del agua bajó ~7 m, y el otro ubicado en el centro sur de Nogales, Sonora, donde el nivel del agua bajó ~19 metros.

Se seleccionó un conjunto de pozos distribuidos a lo largo del SCAMA (Figura 6.3) para ilustrar las tendencias del nivel de agua subterránea en el espacio y tiempo (Figura 6.2). Los hidrogramas de la Figura 6.3 se presentan a grandes rasgos según la ubicación de los pozos, de aguas arriba hacia aguas abajo. Al analizar los hidrogramas, se identifican varios patrones. En primer lugar, como se esperaba, la profundidad al nivel del agua subterránea generalmente aumenta conforme se incrementa la distancia respecto al cauce del Río Santa Cruz, incluso cuando los pozos se localizan a lo largo de tributarios. Una excepción es el pozo 55-537957, ubicado justo al norte de la frontera y a lo largo del Arroyo Nogales, el cual podría ser afectado por fugas en la infraestructura o a recarga del acuífero proveniente de descargas de aguas residuales o aguas tratadas en el Arroyo Nogales. De los pozos localizados a lo largo del Río Santa Cruz (Figura 6.2), algunos presentan una profundidad al nivel de agua subterránea relativamente estable (312109110352501, ST32, 312048110504901), mientras que otros muestran fluctuaciones más pronunciadas (55-603439, 55-619351) o bien tendencias de incremento o descenso a lo largo de distintos periodos. Las diferencias observadas pueden

estar influenciadas por factores como el diseño y la construcción de los pozos, la geología local, la extracción cercana de agua subterránea y la proximidad al cauce del río.

Los hidrogramas de los pozos ubicados a lo largo de tributarios que muestran un incremento en la profundidad al nivel de agua subterránea incluyen dos pozos situados en tributarios de la cabecera del Río Santa Cruz (55-624898, 55-640950). En ambos casos, el descenso durante el periodo analizado es relativamente pequeño, sin embargo, se observa una tendencia general de incremento en la profundidad al nivel de agua subterránea desde las primeras hasta las últimas mediciones. De manera similar, los pozos ubicados en los tributarios del extremo más aguas abajo del SCAMA también presentan incrementos relativamente pequeños en la profundidad al nivel freático (55-616247, 55-801469). Los pozos 55-603432 y 55-506340, ambos localizados a lo largo del arroyo Potrero, muestran igualmente una tendencia general de incremento en la profundidad al nivel de agua subterránea durante el periodo de datos analizado, aunque presentan un aumento temporal en los niveles de agua subterránea aproximadamente entre 2010 y 2018. Este comportamiento podría estar relacionado con eventos de precipitación significativa, por ejemplo, el incremento observado alrededor de 2014 probablemente sea resultado del huracán Odile, el cual representó una fuente importante de recarga en el sureste de Arizona (Uhlman et al., 2020). Respuestas similares entre 2010 y 2018 no se observan en los hidrogramas de otros pozos mostrados en la Figura 6.3.

La mayor magnitud de variabilidad se observa en el pozo 55-603439, localizado aproximadamente 10 kilómetros aguas abajo del pozo 312048110504901, el cual presenta niveles de agua subterránea relativamente estables. Sin embargo, el pozo aguas abajo se encuentra más cercano al cauce del río y fue perforado dentro de los sedimentos aluviales altamente transmisivos del río. Las fluctuaciones estacionales relativamente grandes (de hasta 15 metros) observadas en este pozo concuerdan con el patrón identificado en las tres microcuencas del sur del Río Santa Cruz (Erwin, 2007). Este pozo (55-603439) también presenta una tendencia general de incremento en la profundidad del nivel de agua subterránea a lo largo del tiempo, siendo particularmente evidente el periodo desde aproximadamente el año 2000 hasta la actualidad. Este mismo periodo es observable en pozos ubicados aguas abajo (55-619351, 55-619348, 55-610533), aunque con una menor magnitud del incremento, y con recuperación parcial de los niveles freáticos en el pozo 55-619348. Cerca del límite norte del SCAMA, los pozos 55-627932 y 55-612066 muestran un incremento general considerable en la profundidad al nivel de agua subterránea a lo largo del periodo de registro, con cierta recuperación a partir de aproximadamente 2015. Es posible que la extracción de agua subterránea en el Tucson AMA influya en los niveles freáticos en el extremo norte del SCAMA, particularmente cerca del cauce del Río Santa Cruz.

El monitor de sequía del ADWR indica que Arizona entró en condiciones de sequía en enero del año 2000 y ha permanecido, de forma continua, en distintos niveles de sequía desde enero de 2002 hasta

la actualidad (ADWR, 2025c). En conjunto, el efecto de esta sequía sobre la profundidad al nivel de agua subterránea es evidente en los hidrogramas de muchos de los pozos analizados. Para comprender las excepciones observadas, sería necesario realizar análisis adicionales. La comparación de registros constructivos de los pozos, la geología local y los patrones espaciales y temporales de extracción de agua subterránea permitiría mejorar la comprensión del comportamiento de aquellos pozos que no responden de manera evidente a los efectos de la sequía.

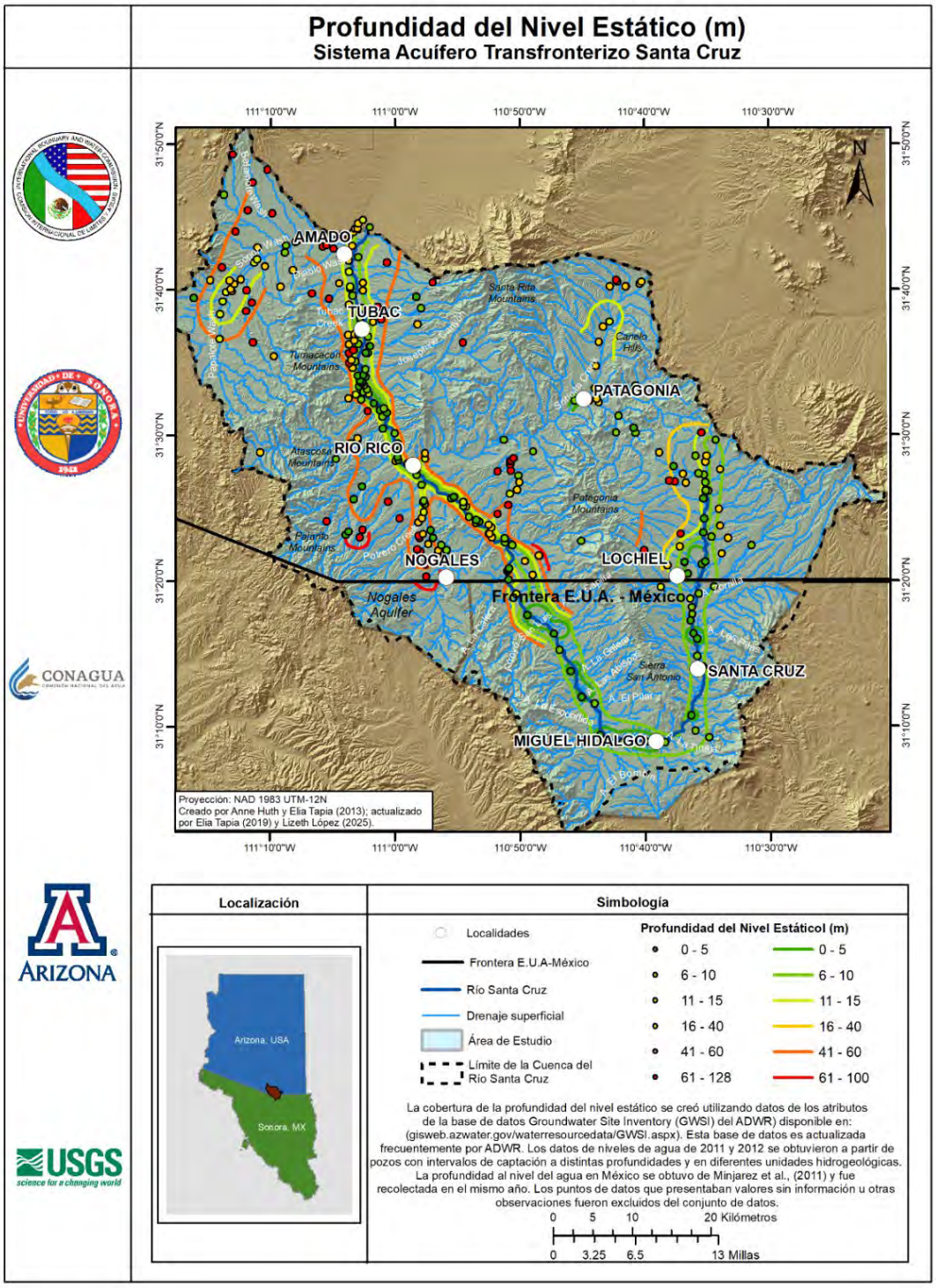


Figura 6.11 Profundidad al nivel estático del agua en el TSCAS para el año 2011, con algunos datos de 2012 incluida en la base de datos GWSI.

Los contornos se desarrollaron utilizando interpolación de ponderación de distancia inversa ArcGIS y se corrigieron manualmente en áreas sin flujo, como montañas o unidades geológicas no permeables.

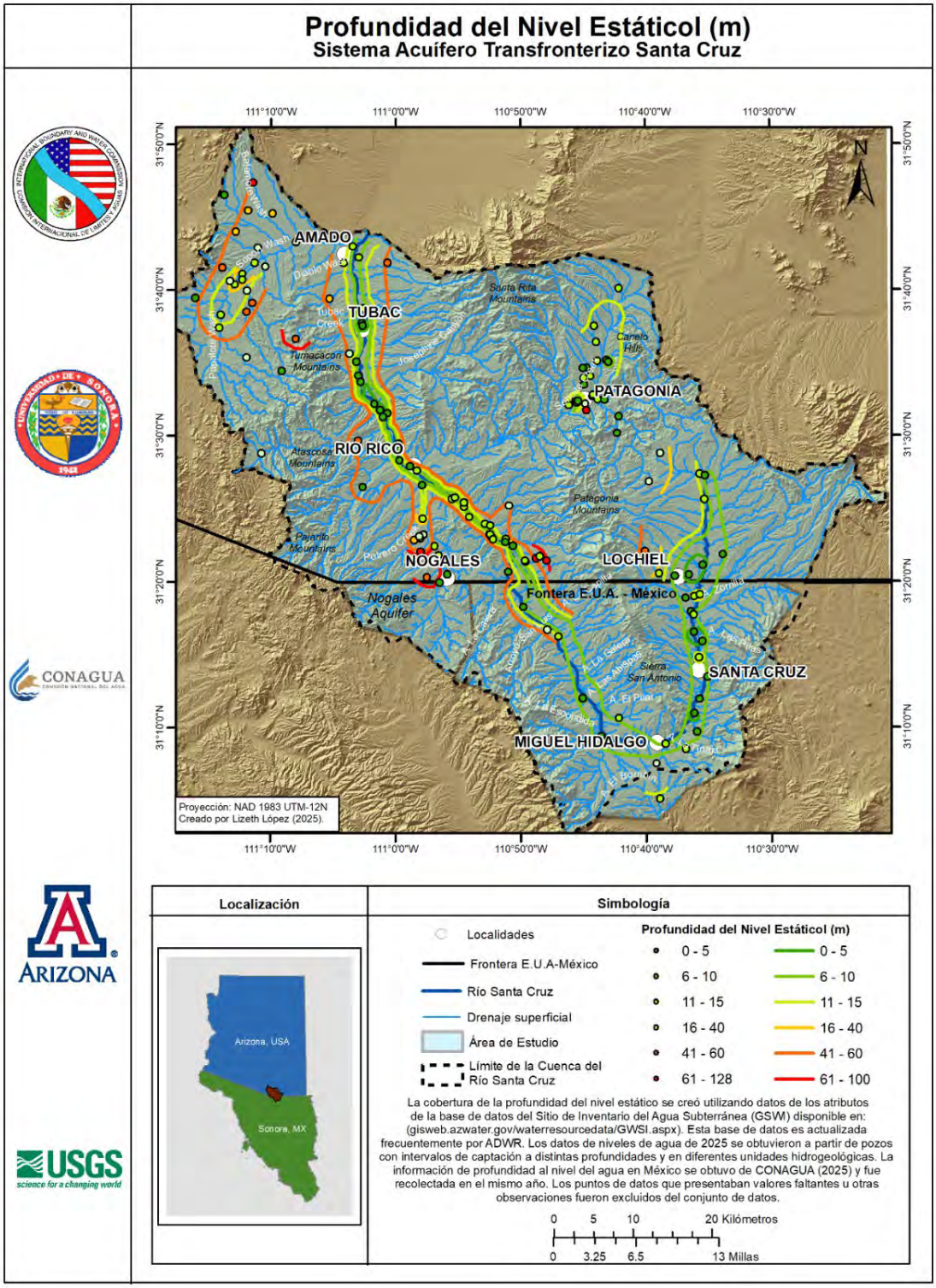


Figura 6.12 Profundidad al nivel estático del agua en el TSCAS para el año 2025.

Los contornos se desarrollaron utilizando interpolación de ponderación de distancia inversa ArcGIS y se corrigieron manualmente en áreas sin flujo, como montañas o unidades geológicas no permeables.

6.5. Parámetros Hidráulicos

Los datos para estimar los parámetros hidráulicos fueron escasos o difíciles de encontrar en algunas partes del TSCAS. Parecen no estar disponibles para el Valle de San Rafael o la cuenca superior del arroyo Sonoita, y hubo un número limitado de pruebas para la cuenca de Nogales.

Con respecto al SCRAS, las pruebas de acuíferos (pruebas de bombeo) fueron realizadas por Minjarez et al. (2011) (Figura 6.13) para la estimación de la transmisividad (T) y la conductividad hidráulica (K). Los valores T del acuífero fueron altos en todas las pruebas, lo que respalda los hallazgos de los capítulos 4 y 5 que indican que la unidad del acuífero primario corresponde a sedimentos más permeables, como arenas con lentes de arcilla ocasionales. Los valores de T variaron entre $1.78x10^{-2}$ m^2/s y $9.27x10^{-3}$ m^2/s. Los valores de K variaron entre $1.92x10^{-3}$ m/s y $6.85x10^{-4}$ m/s (Tabla 6.5). El valor mínimo de K se encontró en el pozo STC-05. El mayor valor de K se encontró en el pozo STC-12. Los valores de K correspondieron al porcentaje de arena presente en la unidad donde los valores de K disminuyeron con la presencia de arcillas (una reducción porcentual en arena). En la NAS se estimó un valor de K insaturado de 3.33×10^{-8} m/s con un contenido de agua del 20 por ciento (GAS-CONAGUA, 2024b).

Tabla 6.5 Valores de transmisividad y conductividad hidráulica derivados de pruebas de acuífero en el SCRAS (Minjarez et al., 2011).

Nombre del pozo	X	Y	Elevación	t (m^2/min)	T (m^2 /s)	k (m/min)	k (m/s)
STC-05	534,382	3,446,200	1,288	$5.03x10^{-1}$	$8.38x10^{-3}$	$1.18x10^{-2}$	$1,97x10^{-4}$
STC-12	538,332	3,457,091	1,380	$5.56x10^{-1}$	$9.27x10^{-3}$	$3.39x10^{-1}$	$5.65x10^{-3}$
STC-16	538,069	3,461,390	1,388	$3,77x10^{-1}$	$6.28x10^{-3}$	$4.11x10^{-2}$	$6.85x10^{-4}$
STC-26	525,361	3,451,086	1,226	$1.07x10^{0}$	$1,78x10^{-2}$	$1.15x10^{-1}$	$1,92x10^{-3}$
STC-50	518,140	3,462,096	1,167	$1.60x10^{0}$	$3.68x10^{-2}$	$2.30x10^{-2}$	$3,83x10^{-4}$

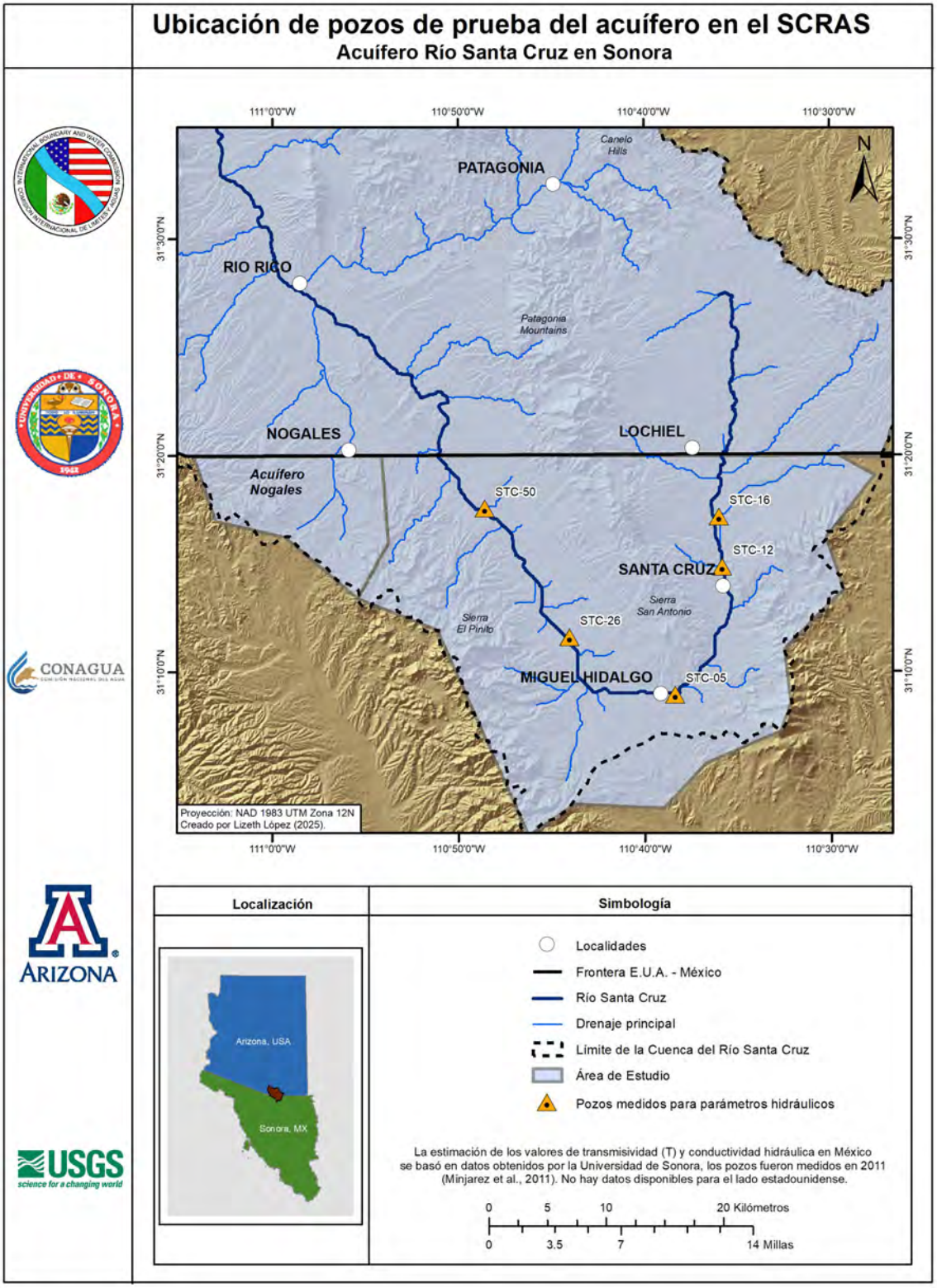


Figura 6.13 Ubicación de pozos medidos a lo largo del SCRAS.

En el SCAMA, Nelson (2007) y Erwin (2007) documentaron varias pruebas de bombeo. Las estimaciones adicionales de parámetros hidráulicos provienen de estimaciones generadas por modelos numéricos de flujo de agua subterránea. El ADWR desarrolló dos modelos regionales de flujo de agua subterránea para facilitar la gestión de los recursos hídricos regionales en el SCAMA (Nelson, 2007; Erwin, 2007). En esta sección, analizamos estos modelos con respecto a los parámetros hidráulicos, pero se brindan detalles adicionales en el Capítulo 8. El modelo de flujo de agua subterránea documentado en el Informe de modelación ADWR No. 15, desarrollado por Erwin (2007), aborda el área dentro de la frontera entre Estados Unidos y México y la PITAR de Nogales, un área a la que a veces se hace referencia como las microcuencas. El modelo simuló las condiciones hidrológicas desde octubre de 1997 hasta septiembre de 2002 y dentro de un dominio de aproximadamente 100 km^2. El modelo está compuesto por tres capas y 2,500 celdas activas, con dimensiones superficiales de 200 por 200 m. El modelo simuló las conexiones hidráulicas entre el Río Santa Cruz y el sistema de agua subterránea con forzamiento de precipitación biestacional (Erwin, 2007).

Los valores de T estimados por el modelo en el SCAMA variaron considerablemente dependiendo de la formación geológica. En el área de las microcuencas en el aluvión más joven, las pruebas de acuíferos indicaron valores de T entre 540 y 1,540 m^2/d con coeficientes de almacenamiento (S) de 0.14 a 2 (Erwin, 2007). En el aluvión más antiguo, Erwin (2007) informó un valor único de T de 7 m^2/d con un valor S igual a $1.4x10^{-3}$ y un valor K estimado de $1.1x10^{-6}$ m/s. En las microcuencas, solo hubo una medición que incluyó la Formación Nogales, pero la sección ranurada del pozo se ubicó en el aluvión más antiguo al igual que la Formación Nogales. Por lo tanto, los valores informados de T, S y K representaron una mezcla de las propiedades de los dos acuíferos. Erwin (2007) presentó dos valores para cada propiedad que dependían del método utilizado para el análisis. La diferencia en la magnitud de los valores fue insignificante. Por esta razón, se reportan los resultados analizados mediante el método de Theis: T = 26 m^2/d, S = $1.25x10^{-6}$ y K = $1.8x10^{-6}$ m/s. La Formación Salero aflora en dos lugares del área de microcuencas, unos kilómetros al sur del arroyo Sonoita. Los valores de T en tres pozos de la Formación Salero variaron de 19 a 68 m^2/d, y los valores de S oscilaron entre 0.1 y 0.15. Además, en algunos lugares, la roca cristalina puede funcionar como acuífero. En la parte sur de las microcuencas se registraron valores de T de 11 m^2/d, S = $1.1x10^{-4}$ y K = $3.5x10^{-6}$ m/s en un pozo donde la zona productora de agua era granodiorita. Para el modelado de aguas subterráneas, dependiendo del área, Erwin (2007) utilizó valores calibrados para K de entre $1.2x10^{-3}$ y $3.4x10^{-3}$ m/s, con valores de S que oscilaban entre 0.14 y 0.20 para el aluvión más joven. En el aluvión más antiguo, se utilizaron valores de entre $6.7x10^{-7}$ y $3.9x10^{-6}$ m/s con un valor de rendimiento específico (Sy) de 0.025. Para la Formación Salero se utilizó un valor de K de $1.1x10^{-5}$ y Sy de 0.15.

El modelo de flujo de agua subterránea documentado en el Informe de modelación ADWR No. 14, desarrollado por Nelson (2007), analizó el

tramo del Río Santa Cruz, dominado por efluentes, ubicado entre la PITAR y el puente Elephant Head. El modelo simula cargas hidráulicas, flujos y balances de agua para condiciones de estado estacionario y transitorias para los períodos 1997 y 2002. El modelo considera tres unidades de relleno de cuenca: el aluvión más joven, el aluvión más antiguo y la Formación Nogales (Nelson, 2007). Nelson (2007) resumió la información sobre las propiedades hidráulicas en el área del SCAMA entre la NIWTP y Amado, Arizona. Hubo varias pruebas de bombeo y aquí solo se informan los valores de K derivados de T. Se supuso que los valores de conductividad hidráulica vertical (Kv) en esta parte del acuífero eran una décima parte del valor de conductividad hidráulica horizontal (Kh), y que Kh era isotrópico. Para el aluvión más joven cerca de Río Rico, Arizona, Nelson (2007) reportó grandes valores de K que variaron de $1.8x10^{-4}$ a $6.8x10^{-3}$ m/s, con una Sy de 0.19 y valores de S de 0.0001 a 0.0098. En la zona de Tubac y Amado los valores de K variaron entre $1.8x10^{-4}$ y $2.2x10^{-3}$ m/s con valores de S entre $7.7x10^{-4}$ y $8.7x10^{-4}$.

Para el aluvión más antiguo, que es menos permeable que el aluvión más joven y, en algunos lugares, consolidado, Nelson (2007) reportó valores de K cerca de Tubac y Amado de entre $3.5x10^{-6}$ y $5.7x10^{-4}$ m/s, con valores de S de $6x10^{-4}$ y $4x10^{-3}$. Al este de Tubac, los valores de K son más bajos y menos variables; los valores de K variaron entre $3.5x10^{-6}$ y $4.4x10^{-5}$ m/s. Cerca de Río Rico, los valores de K observados estuvieron entre $7.1x10^{-6}$ y $1.7x10^{-4}$ m/s con valores de S de $1x10^{-4}$ y $2x10^{-4}$. En la Formación Nogales para esta parte de la cuenca, solo hubo tres pozos con mediciones de T y valores de K. La Formación Nogales tiene tendencia a estar más litificada que el aluvión más antiguo. Así, los valores de K son más bajos, variando entre $6.14x10^{-7}$ y $5.96x10^{-6}$ m/s con un valor de S de $1.1x10^{-4}$.

Para la modelación de aguas subterráneas, Nelson (2007) simuló dos casos, un “caso base” para los años 1997-2002 y un caso previo al desarrollo. Los valores de K calibrados para los dos casos fueron similares, por lo que aquí solo se dan los valores para el caso base. En el modelo, el aluvión más joven se dividió en dos áreas: Norte y Río Rico. La conductividad hidráulica en la parte norte fue de $3.88x10^{-4}$ m/s, y en el área de Río Rico fue de $2.48x10^{-4}$ m/s. El aluvión más antiguo se dividió en cuatro áreas con valores de K que variaron entre $1.27x10^{-7}$ m/s y $1.02x10^{-4}$ m/s. La Formación Nogales fue modelada como una unidad homogénea (Knog, K=$3.56x10^{-7}$ m/s) excepto por un área cercana al afluente arroyo Sopori (Knog_Sopori, K = $1.89x10^{-5}$ m/s).

Ha habido varias discusiones sobre los cambios temporales en Kv de los sedimentos del lecho del Río Santa Cruz (Treese et al., 2009; Nelson, 2007). Se ha propuesto que estas variaciones ocurrieron antes de la mejora de la PITAR en 2009 debido a la disminución estacional de la permeabilidad causada por el crecimiento de algas y otros microorganismos en los poros de los sedimentos. El crecimiento de algas fue causado por altas concentraciones de amoníaco en el agua vertida desde la PITAR y la falta de perturbación en el lecho del río durante la descarga. (Treese et al., 2009). Por esta razón, Nelson (2007) asignó valores de K en el modelo que variaban de un período de estrés a otro dependiendo del caudal, desde un

mínimo de $3.5x10^{-7}$ hasta un máximo de $1.1x10^{-5}$ m/s. En 2009, la PITAR pasó del nivel de tratamiento secundario al terciario (Tapia-Villaseñor et al., 2020). Las concentraciones de nitrógeno en el efluente tratado se redujeron después de la mejora. Con esta reducción se impidió la formación del sello biológico conduciendo a un aumento en la permeabilidad del lecho del arroyo (Treese et al., 2009; Tapia-Villaseñor et al., 2020).

6.6. Conclusiones

El análisis de monitoreo de aguas subterráneas para el TSCAS muestra un aumento general en la demanda total de aguas subterráneas tanto para Estados Unidos como para México, que está dominado por el uso agrícola para riego y, en los últimos años, por usuarios industriales en México. Se ha identificado una alta densidad de pozos en zonas urbanas como Nogales y Tubac, lo que refleja una mayor presión sobre los recursos hídricos en estas áreas debido a actividades domésticas, agrícolas e industriales. La profundidad hasta el nivel del agua subterránea es variable en el TSCAS, con mayores profundidades a medida que aumenta la distancia al Río Santa Cruz. El análisis del uso del agua subterránea y el comportamiento piezométrico es importante para apoyar la comprensión del estado de la demanda actual de agua subterránea en la región y poder informar la toma de decisiones con respecto a las áreas sobreexplotadas. La información sobre parámetros hidráulicos puede ser útil para desarrollar modelos conceptuales y numéricos de flujo. Generalmente, los valores más altos de T y K se encuentran en el aluvión más joven asociado con el Río Santa Cruz. Los valores tienden a aumentar río abajo, pero pueden variar de dos a tres órdenes de magnitud en distancias de uno a dos kilómetros. El aluvión más antiguo y la Formación Nogales tienen valores más bajos de T y K que dependen en gran medida del grado de consolidación y fracturación, respectivamente.

Con la finalidad de mejorar la comprensión del sistema acuífero binacional, futuros esfuerzos podrían enfocarse en el monitoreo regular de la profundidad del nivel de agua subterránea, con el fin de caracterizar los cambios en el almacenamiento de agua y la evolución de la superficie piezométrica a través del tiempo. Pruebas de acuífero y estudios geofísicos ayudarían a refinar la estimación de las propiedades del acuífero en áreas donde los datos son limitados. Además, la integración de información de múltiples fuentes de datos, como CONAGUA y OOMAPAS, permitiría respaldar una evaluación más integral y coordinada de las condiciones de agua subterránea a lo largo del sistema binacional. En conjunto, estos esfuerzos fortalecerían la base técnica para futuras evaluaciones y apoyarían una toma de decisiones informada y basada en evidencia científica en materia de recursos de agua subterránea dentro del TSCAS.

Bibliografía

Arizona Department of Water Resources (ADWR) 2025c, Drought in Arizona, 2000 to present, data dashboard. Consultado el 2 de octubre de 2025 at https://www.azwater.gov/drought/drought-data-dashboard.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2024, Supply & Demand, Santa Cruz AMA, Consultado el 7 de Abril de 2025 en https://www.azwater.gov/supply-demand.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2025a, Groundwater Site Inventory (GWSI). 2025a. Consultado el 27 de Marzo de 2025 en: https://azwatermaps.azwater.gov/gwsiweb/.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2025b, Well Record Search, aplicación web. Consultado el 27 de marzo de 2025 en https://www.azwater.gov/permitting-wells/well-record-search.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), Active Management Areas. 2021. Consultado el 23 de septiembre de 2021 en: https://new.azwater.gov/ama

Arizona Department of Water Resources (ADWR), Santa Cruz Active Management Area Water Demand and Supply Assessment: 1985-2025, Arizona Department of Water Resources, 2012. Consultado el 7 de Abril de 2025 en http://www.azwater.gov/AzDWR/WaterManagement/Assessments/documents/SCAMA_AssessmentSummarySheet.pdf .

Arizona Department of Water Resources (ADWR). "SCAMA FOURTH MANAGEMENT PLAN. Santa Cruz Active Management Area (Draft)," 1 de junio de 2020. https://www.azwater.gov/sites/default/files/media/SCAMA%20FINAL%2010-20-2020.pdf.

CONAGUA-REPDA 2022 (Comisión Nacional del Agua-Registro Público de Derechos de Agua). "Registro Público de Derechos de Agua", 2019 2007.

Cruz Ayala, M.-B., y Tortajada, C. 2022. Managed aquifer recharge in Mexico: Proposals for an improved legal framework and public policies. Water International, 48(3), 1–19. https://doi.org/10.1080/02508060.2022.2132668

Cruz-Ayala, M. B., y Megdal, S. B. 2020. An Overview of Managed Aquifer Recharge in Mexico and Its Legal Framework. Water, 12(2), 474. https://doi.org/10.3390/w12020474

Diario Oficial de la Federación. 2015. Acuerdo por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del acuífero Río San Pedro, clave 2616, en el Estado de Sonora. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5427044

Diario Oficial de la Federación. 1978. Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del estado de Sonora, para el mejor control de las extracciones, alumbramiento y aprovechamiento de las aguas del subsuelo, en dicha zona.

https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4729825&fecha=19/09/1978&cod_diario=203851

Diario Oficial de la Federación. 1992. Ley de Aguas Nacionales. https://www.ordenjuridico.gob.mx/Publicaciones/pdf/L5.pdf

Erwin, Gretchen. 2007. "Modelo de Flujo de Agua Subterránea del Límite Internacional de Microcuencas del Área de Manejo Activa de Santa Cruz hasta la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales Condado de Santa Cruz, Arizona". Informe de modelado n.° 15. http://www.azwater.gov/AzDWR/Hydrology/Modeling/documents/Modeling_Report_15.pdf .

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024a, "Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Río Santa Cruz (2615) Estado de Sonora." https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2615.pdf.

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024b. "Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Nogales (2650) Estado de Sonora." https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2650.pdf

Minjarez Sosa, I., Monreal Saavedra, R., Grijalva Noriega, F.J., Ochoa Granillo, J.A., Tapia Villaseñor, E.M., Rangel Medina, M., Montijo González, A., 2011. Actividades Hidrogeológicas en el Acuífero Río Santa Cruz, Estado de Sonora, Primera Etapa. Hermosillo, Sonora.

Nelson, K.M., Groundwater Flow Model Of The Santa Cruz Active Management Area Along The Effluent-Dominated Santa Cruz River Santa Cruz and Pima Counties, Arizona." Arizona Department of Water Resources, 2007. Accessed April 7, 2025 via a link at https://www.azwater.gov/hydrology/field-services/hydrology-publications-and-data.

Tapia-Villaseñor, E.M., Shamir E., Megdal, S.B., Petersen-Perlman, J.D., 2020, Impacts of Variable Climate and Effluent Flows on the Transboundary Santa Cruz Aquifer. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 56 (3): 409–30. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12853.

Tapia-Villaseñor, E.M.; Shamir, E.; Cruz-Ayala, M.B.; Megdal, S.B., 2022, Assessing Groundwater Withdrawal Sustainability in the Mexican Portion of the Transboundary Santa Cruz River Aquifer. Water 2022, 14, 233. https:// doi.org/10.3390/w14020233.

Treese, S., Meixner, T., Hogan, J.F., Clogging of an Effluent Dominated Semiarid River: A Conceptual Model of Stream-Aquifer Interactions. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 45, no. 4 (August 2009): 1047–62. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00346.x.

Uhlman, K., Eastoe, C., Guido, Z., Crimmins, M.A., Purkey-Deller, A., Eden, S., 2020, Assessing aquifer vulnerability to climate variability through community participation in Arivaca, Arizona. Journal of

Contemporary Water Research and Education, 170:2-18, https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2020.03337.x.

7. HIDROGEOQUÍMICA

7.1. Introducción y métodos

En este capítulo se describen los esfuerzos de colaboración entre Estados Unidos y México para mejorar la comprensión de las características geoquímicas del TSCAS. Los principales factores que influyen en el agua subterránea del TSCAS son la geología del basamento, el uso de suelo y el uso del agua. El crecimiento demográfico, la presencia natural de rocas mineralizadas con su correspondiente drenaje ácido de roca, la minería histórica y el drenaje ácido de mina, así como las actividades industriales y de tratamiento de aguas residuales, han afectado la calidad del agua de todo el TSCAS desde los inicios de la evolución del paisaje hasta las últimas décadas.

En este capítulo se describe la información disponible sobre el marco geológico (mineralogía-geología), muestreo hidro-geoquímico, datos de calidad de agua y datos de isótopos estables de la región de estudio. Se distingue entre el muestreo de calidad del agua (evaluación de la aptitud del agua para usos específicos) y el muestreo hidrogeoquímico (realizado con el objetivo de comprender los procesos ambientales y geológicos). Aunque el muestreo de isótopos es un tipo de muestreo hidrogeoquímico, se menciona de manera independiente debido a que existe una sección separada del capítulo dedicada al uso de datos de isótopos para desarrollar un modelo hidrológico del área de estudio. Este capítulo también incorpora los resultados de estudios de calidad de agua y estudios de pozos en el TSCAS.

Los datos geoquímicos disponibles incluyen iones mayores en aguas subterráneas y superficiales, parámetros de campo, elementos traza (en partes por billón) e isótopos estables de los materiales de origen. Estos datos se utilizan para comprender la hidrogeoquímica del sistema. La química de aguas subterráneas depende en gran medida de la interacción roca-agua. Las fases sólidas, principalmente especies minerales inorgánicas, controlan la liberación y retención de los componentes disueltos del agua subterránea. A medida que el agua subterránea se desplaza a través de la roca, se produce una serie de reacciones químicas (efectos de meteorización) que dependen de la naturaleza química del agua, la disponibilidad de elementos en las diversas formaciones geológicas y el tiempo total de residencia del agua subterránea. Estos procesos incluyen la disolución/precipitación, intercambio iónico y oxidación/reducción.

El acuífero aluvial de relleno de cuenca de las tierras bajas de la cuenca alta del Río Santa Cruz constituye la principal unidad acuífera y se distingue aquí de los acuíferos en rocas cristalinas de los bloques montañosos (Islas del Cielo) dentro del área del TSCAS (Figura 7.1).

Una de las principales preocupaciones en los bloques montañosos es la liberación de metales disueltos durante la meteorización de rocas mineralizadas y de las zonas de alteración asociadas. La interacción del agua subterránea con minerales que consumen ácido, por ejemplo, en rocas carbonatadas, puede modificar la química del agua subterránea. La composición química del agua subterránea en estos sistemas, con bajas relaciones agua-roca, es el resultado de los efectos combinados de estos procesos (Plumlee, 1999; Elango y Kannan, 2007). Las cadenas montañosas pueden proporcionar

recarga de frente de montaña, recarga de bloque de montaña o recarga superficial por escorrentía, así como materiales erosivos al acuífero aluvial en las tierras bajas. Los acuíferos en bloques montañosos y los acuíferos aluviales difieren considerablemente en sus características hidrológicas (permeabilidad, porosidad, capacidad de almacenamiento de agua) y en su potencial de interacción química agua-roca.

En este capítulo: 1) se enumeran las fuentes de datos y se explica cómo han sido utilizadas; 2) se revisan los datos geoquímicos del agua subterránea en los acuíferos de roca dura de las zonas altas, en el contexto de la geología de los sistemas acuíferos; 3) se revisa la geoquímica del agua subterránea y del agua superficial en el acuífero aluvial de relleno de cuenca de las tierras bajas; y 4) se revisan los datos de isótopos estables para ambos tipos de acuíferos y para el agua superficial en y alrededor de la Sierra de Patagonia.

7.2. Métodos

La hidrogeoquímica, el marco geológico, incluyendo los depósitos minerales, y la calidad de agua del TSCAS se han evaluado combinando los resultados de tres fases de estudio: 1) revisión bibliográfica de estudios previos sobre calidad de agua, informes y artículos indexados; 2) revisión de datos relevantes derivados de mapas geológicos, incluyendo fallas y estructuras relacionadas, datos de perfiles tridimensionales del subsuelo y análisis mineralógicos junto con la química de las rocas y los suelos; y 3) recopilación y análisis de datos disponibles de manera consistente. Para desarrollar un enfoque consistente, fue necesario: 1) el consenso del equipo técnico binacional del TAAP sobre el alcance del estudio, concretamente sobre los parámetros que debían incluirse y, en la medida de lo posible, un intervalo de tiempo común; 2) disponibilidad de datos, con preferencia por bases de datos binacionales; 3) consenso sobre la presentación de los mapas; 4) descripciones binacionales consistentes, y 5) consenso sobre los métodos de muestreo y análisis aceptables. Los parámetros seleccionados incluyeron iones mayores, parámetros físicos, isótopos estables y química de elementos traza de rocas, suelos y agua. Los datos sobre la parte estadounidense del TSCAS se obtuvieron del Departamento de Calidad Ambiental de Arizona (ADEQ), así como de información publicada por el USGS (Coes et al., 2000; Wanty et al., 2001; Gray et al., 2000 y 2004). Para la parte mexicana, la información se obtuvo de los datos y análisis publicados en Minjarez et al. (2011) (Tabla 7.1). Robertson (1991) proporcionó un marco adicional para interpretar los datos sobre los procesos hidroquímicos en las cuencas aluviales, en el cual describió la evolución de la química del agua subterránea en términos de un sistema de reacción de 13 componentes. El estudio detalló las principales reacciones como 1) disolución y precipitación de calcita y dolomita, 2) meteorización de feldespatos y minerales ferromagnesianos, 3) formación de montmorillonita, oxihidróxidos de hierro, sílice y, en menor medida, 4) intercambio iónico.

7.3. Normas de la Calidad del Agua

Los datos compilados considerados aceptables se compararon con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 para uso y consumo humano,

así como con los estándares de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (Tabla 7.1). En los casos en que no existieron LMP aplicables para México o los Estados Unidos, se consideraron las recomendaciones de Custodio y Llamas (1996). La Tabla 7.2 presenta los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales descargadas en cuerpos receptores nacionales y áreas públicas, conforme a lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-2021. Esta información es particularmente relevante dada la transferencia de aguas residuales entre los Estados Unidos y México analizada en los Capítulos 6 y 7. Adicionalmente, la Tabla 7.3 proporciona un listado de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) utilizadas para el análisis de muestras de agua en la porción mexicana del TSCAS, y sirve como referencia para fines de control de calidad. La tabla incluye las normas vigentes al momento en que se analizaron las muestras, así como versiones actualizadas para considerar posibles cambios metodológicos.

Tabla 7.1 Comparación de las normas mexicanas (NOM-127-SSA1-2021) y estadounidenses (EPA, 2016) sobre agua potable para determinados compuestos.

Contaminante	NOM-127-SSA1-2021 (mg/L)	DIRECTRICES DE LA EPA DE EE. UU. (LMP) (mg/L)
Aluminio	0.20	**0.05** a 0.2**
Arsénico	0.025	0.010 Cero MCLG
Bario	**1.3**	2
Benceno	0.01	**0.005** Cero MCLG
Cadmio	**0.005**	**0.005**
Cianuro (CN-)	**0.07**	0.2
Cloruro (como Cl-)	**250**	**250****
Cobre	2	**1.3**
Cromo (total)	**0.05**	0.1
Fluoruro (como F-)	**1.50**	4
Hierro	**0.3**	**0.3**
Plomo	**0.010**	0.015*
Manganeso	0.15	**0.05**
Metoxicloro	**0.02**	0.04
Mercurio	0.006	**0.002**
Nitrato (medido como N)	11	**10**
Nitrito (medido como N)	**0.9**	1.0
Pesticidas: Aldrina y dieldrina +	**0.00003**	0.001 0.002
Sulfato (como SO_4 =)	400	**250**
Tolueno	**0.7**	1
Total de trihalometanos ***	0.20	**0.080**
Xileno	0.5 (tres isómeros)	10 (total)

Zinc	**5.0**	**5.0**
Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4, D)	**0.03**	0.07

Los valores mostrados en negritas indican el estándar más restrictivo (el valor más bajo) entre ambos marcos regulatorios.

*Nivel de acción del cobre 1.3 mg/L; nivel de acción del plomo 0.015 mg/L

**Estos contaminantes figuran en el Reglamento Nacional Secundario sobre el Agua Potable (no están sujetos a cumplimiento obligatorio)

+ Aldrina y dieldrina en https://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tf.asp?id=316&tid=56 Desde la década de 1950 hasta 1970, la aldrina y la dieldrina fueron pesticidas ampliamente utilizados en cultivos como el maíz y el algodón. Debido a la preocupación por los daños al medio ambiente y, potencialmente, a la salud humana, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) prohibió todos los usos de la aldrina y la dieldrina en 1974, excepto para el control de termitas. En 1987, la EPA prohibió todos los usos.

Objetivo de nivel máximo de contaminantes (MCLG): nivel de un contaminante en el agua potable por debajo del cual no se conoce ni se prevé ningún riesgo para la salud. Los MCLG permiten un margen de seguridad y son objetivos de salud pública no vinculantes.

Nivel máximo de contaminantes (MCL): el nivel más alto de un contaminante permitido en el agua potable. Los MCL se establecen lo más cerca posible de los MCLG utilizando la mejor tecnología de tratamiento disponible y teniendo en cuenta el costo. Los MCL son normas exigibles.

*** Aunque no existe un MCLG colectivo para este grupo de contaminantes, existen MCLG individuales para algunos de los contaminantes individuales: Trihalometanos: bromodiclorometano (cero); bromoformo (cero); dibromoclorometano (0,06 mg/L): cloroformo (0.07 mg/L). Ácidos haloacéticos: ácido dicloroacético (cero); ácido tricloroacético (0.02 mg/L); ácido monocloroacético (0.07 mg/L). El ácido bromoacético y el ácido dibromoacético están regulados con este grupo, pero no tienen MCLG.

Tabla 7.2 NOM-001-SEMARNAT-2021, límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales de uso público.

Parámetros	Ríos				Suelos		Humedales naturales	
	Uso agrícola Media mensual	Uso agrícola Diario Media	Vida acuática Promedio mensual	Vida acuática Diario Promedio	Agricultura Media mensual	Agricultura Promedio diario	Media mensual	Promedio diario
Temperatura (Celsius)	-	-	35	35	-	-	35	35
Grasas y aceites (mg/L)	15	18	15	18	15	18	15	18
Arsénico (mg/L)	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.1	0.15
Cadmio (mg/L)	0.2	0.3	0.2	0.3	0.05	0.075	0.1	0.15
Cianuro (mg/L)	1.0	2.0	1.5	2.0	2.0	2.5	1.0	1,5
Cobre (mg/L)	4.0	5 .0	4.0	5.0	4.0	5.0	4.0	5.0
Cromo (mg/L)	1.0	1.25	1.0	1.25	0.5	0.75	0.5	0.75
Mercurio (mg/L)	0.01	0.015	0.01	0.015	0.005	0.008	0.005	0.008
Níquel (mg/L)	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	4.0
Plomo (mg/L)	0.2	0.3	0.5	0.75	0.5	0.75	0.2	0.3
Zinc (mg/L)	10	15	10	15	10	15	10	15

Tabla 7.3 Lista de métodos de la Norma Oficial Mexicana utilizados para analizar muestras de agua en Minjarez et al. (2011).

Método de ensayo	**Referencia**

Determinación de la temperatura en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas: método de ensayo	NMX – AA – 007 –SCFI – 2013
Determinación del pH: método de ensayo	NMX – AA – 008 – SCFI – 2011 (Ahora actualizado a NMX-AA-008-SCFI-2016)
Medición de sales y sólidos disueltos en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas - Método de ensayo	NMX – AA – 034 – SCFI – 2001 (Ahora actualizada a NMX-AA-034-SCFI-2015)
Determinación de la acidez y alcalinidad totales en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas	NMX – AA – 036 – SCFI – 2001
Determinación de la turbidez en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas - Método de ensayo	NMX – AA – 038 – SCFI – 2001
Determinación del cloro total en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas - Método de ensayo	NMX – AA – 073 – SCFI – 2001
Determinación de la dureza total en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas - Método de ensayo	NMX – AA – 072 – SCFI – 2001
Determinación de la conductividad eléctrica - Método de ensayo	NMX – AA – 093 – SCFI – 2000 (Ahora actualizado a NMX –AA – 093 – SCFI – 2018)
Determinación del sulfuro	NMX – AA – 084 – 1982
Determinación del fósforo total en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas - Método de ensayo	NMX – AA – 029 – SCFI – 2001
Determinación de iones sulfato	NMX – AA – 074 – 1981 (Ahora actualizado a NMX-AA-074-SCFI-2014
Determinación del fluoruro en aguas naturales, aguas residuales y aguas residuales tratadas - Método de ensayo	NMX – AA – 077 – SCFI – 2001
Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de ensayo	NMX – AA – 079 – SCFI – 2001
Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de ensayo	NMX – AA – 051 – SCFI – 2001 (Ahora actualizado a NMX –AA –051 –SCFI – 2016)

7.4. Aseguramiento de Calidad/Control de Calidad (QA/QC)

Se revisó la información sobre el aseguramiento de calidad y control de calidad (QA/QC) de cada informe o base de datos, cuando estuvo disponible. Para varias fuentes de datos, había poca o nula información disponible sobre QA/QC. Los datos de estas fuentes fueron aceptados en los siguientes casos: 1) cuando correspondían a los datos publicados más antiguos; 2) cuando contribuían a cubrir un vacío significativo en situaciones en las que, de otro modo, se disponía de pocos datos para un parámetro o analito. Dichos datos se han aceptado si se encuentran dentro de los rangos de datos con QA/QC adecuados. Los datos que no se ajustan a los rangos de datos con un QA/QC adecuados se han aceptado en algunos casos si existe una razón plausible para la diferencia, por ejemplo, los efectos de la minería, la geología, el cambio climático, la industria, etc. Sin embargo, esta revisión de QA/QC no resulta estrictamente necesaria, dado que todos los informes utilizados en este estudio han sido previamente publicados.

7.5. Acuíferos de las Tierras Altas del TSCAS

7.5.1. Introducción

En esta sección se describen las condiciones hidrológicas e hidrogeoquímicas del interior de los acuíferos de roca dura de las principales sierras documentadas en la zona de estudio, así como su relación, si la hay, con los acuíferos aluviales adyacentes. Entre los posibles usos de esta información se incluyen la modelación de agua subterránea y geoquímica. Al especificar las condiciones de frontera adecuadas en los modelos de agua subterránea, los hidrogeólogos pueden simular y

predecir el comportamiento del flujo de agua subterránea y el transporte de contaminantes dentro de los sistemas acuíferos, lo que ayuda a comprender y gestionar mejor los recursos de agua subterránea y a comprender los posibles impactos ambientales. En la modelación de los acuíferos aluviales de la provincia de Sierras y Valles (Basin and Range), se suelen asumir condiciones de frontera de flujo específico (es decir, valor de flujo constante) o de ausencia de flujo (es decir, ausencia de flujo a través de límites relativamente impermeables como roca madre no fracturada o arcilla). Si bien está claro que el balance hídrico de una cuenca aluvial incluye el agua que fluye por la superficie hacia la cuenca, puede no reconocerse que en las zonas áridas una proporción significativa de la recarga puede producirse a través de sistemas acuíferos de roca dura en sistemas montañosos (Eastoe y Towne, 2018). La comprensión de la hidrología de las sierras de la zona de estudio es fundamental para comprender el funcionamiento integral del área de estudio.

El ejemplo que se considera aquí es el de las Montañas Patagonia, en el centro de la zona de estudio del TSCAS (Figura 1.2), que alberga algunos de los basamentos rocosos más intensamente mineralizados de la Provincia de Sierras y Valles (Basin and Range), en el sur de Arizona. Las Montañas Patagonia se encuentran en el centro de lo que comúnmente se conoce como el “Gran Grupo” (Great Cluster) de depósitos de cobre porfídico y depósitos asociados de Arizona, Sonora y Nuevo México, y es una de las provincias de cobre más importantes del planeta (Keith y Swan, 1996). Las Montañas Patagonia y la Sierra San Antonio (la parte mexicana de la cordillera) se extienden aproximadamente 70 kilómetros lineales desde la ciudad de Patagonia y el valle de San Rafael en Arizona hasta la curva del Río Santa Cruz, cerca de Santa Cruz, Sonora. Debido a que las Montañas Patagonia han sido objeto de una intensa exploración minera, se dispone de datos geológicos detallados sobre la sierra.

Las condiciones de frontera adecuadas del agua subterránea para la roca dura fragmentada y variable de las Montañas Patagonia no están claras debido a los múltiples episodios de mineralización hidrotermal superpuestos o solapados que se produjeron dentro de la sierra. El desarrollo de modelos de agua subterránea que puedan simular la complejidad geológica y geoquímica causada por las múltiples secuencias de mineralización en la montaña excede el alcance de este informe. Sin embargo, la información aquí presentada servirá de base para futuros modelos diseñados para mejorar la comprensión de los procesos que rigen las principales aguas subterráneas generadoras y neutralizadoras de ácido que interactúan en el régimen de flujo de agua subterránea de la montaña.

7.5.2. Antecedentes

Aunque las cadenas montañosas que rodean la cuenca del Río Santa Cruz contienen acuíferos típicos de roca dura y bajo rendimiento, son importantes para comprender la hidrología y la calidad del agua en la zona de estudio. Las cadenas montañosas de Arizona suelen recibir mayor precipitación anual que los fondos de cuenca (Eastoe y Towne, 2018) y, por lo tanto, son la principal fuente de agua para los acuíferos aluviales de las tierras bajas. En el TSCAS,

las cadenas montañosas albergan numerosos yacimientos hidrotermales de metales básicos y preciosos, algunos de los cuales han sido explotados desde hace siglos. Las operaciones mineras utilizan cantidades importantes de agua, lo que puede afectar los niveles de agua subterránea. Esto puede repercutir tanto en el caudal de los arroyos como en el de los manantiales, los cuales pueden ser fundamentales para el mantenimiento de los ecosistemas montañosos y la recarga de bloque y frente de montaña. La meteorización de las rocas mineralizadas ya sea natural o potenciada por las explotaciones mineras, libera posibles contaminantes al agua subterránea y al agua superficial.

Los acuíferos de roca dura no fracturada o no alterada suelen producir menos agua que los sedimentos no consolidados o semiconsolidados y las rocas carbonatadas (el término "acuífero de roca dura" o "acuífero cristalino", a efectos de este reporte, se refiere a las rocas silicatadas y carbonatadas descritas en los capítulos 4 y 5 de este informe). Esto se debe a los recursos de agua subterránea relativamente escasos en las rocas duras, al mayor contenido mineral, a la baja capacidad de los pozos, a las fuertes variaciones y discontinuidades abruptas en las propiedades de los acuíferos, y a las dificultades en la exploración y la evaluación cuantitativa del recurso (Limaye, 2010). Dados estos retos, los datos sobre el agua subterránea en los acuíferos de las tierras altas (cordilleras) son generalmente escasos porque hay pocos pozos. Gran parte de la información sobre el agua subterránea en las tierras altas proviene de manantiales y de muestreos de caudales base relacionados con manantiales y filtraciones (es decir, métodos de geoquímica del paisaje).

7.5.3. Controles químicos, estructurales y mineralógicos de la permeabilidad

La interacción del agua subterránea con los minerales de la matriz del acuífero desempeña un papel importante en el control de la calidad, el flujo y la disponibilidad del agua en los acuíferos de roca dura. La calidad del agua (o las características químicas del agua) en los acuíferos cristalinos es el resultado del tiempo de residencia y las vías de flujo del agua, que le permiten reaccionar con la composición geoquímica de la litología y, en última instancia, reflejarla. La parte superior del acuífero también puede verse afectada localmente por el uso de suelo y la geomorfología. Entre los controles específicos se incluyen el grado de meteorización, la solubilidad de las especies minerales y la porosidad y permeabilidad de la roca hospedante. En las Montañas Patagonia, el control principal de la calidad del agua subterránea lo ejercen los minerales generadores y neutralizadores de ácido en la roca madre. La recarga de agua subterránea en roca dura se produce a través de la porosidad secundaria (fracturación, meteorización, actividad hidrotermal), desarrollada después de la formación de la roca. A diferencia de las rocas sedimentarias, que a menudo tienen porosidad primaria (espacios porosos formados durante la deposición), las rocas cristalinas como el granito, el basalto y el gneis suelen tener una porosidad primaria muy baja debido a su naturaleza cristalina y entrelazada (Anderson, 2015).

Comprender los mecanismos y las características de la porosidad secundaria en las rocas cristalinas es fundamental para los estudios geológicos y la exploración de recursos. El resultado más significativo de la porosidad secundaria en la parte central del TSCAS es la presencia de múltiples episodios de mineralización y la introducción de metales base mediante fracturamiento hidrotermal y la circulación de fluidos enriquecidos en metales. La mineralización secundaria post-hidrotermal favorece la migración de fluidos, la oxidación de sulfuros minerales y el almacenamiento de agua subterránea en rocas cristalinas como las de las Montañas Patagonia. La porosidad secundaria puede desarrollarse a través de diversos procesos geológicos, incluyendo:

1. Fracturamiento: Las rocas cristalinas pueden experimentar esfuerzos tectónicos que provocan su fracturamiento y el desarrollo de redes de fracturas y diaclasas interconectadas. Con el tiempo, la disolución y otros procesos pueden ampliar estas fracturas, creando espacios porosos secundarios. Otros procesos, como la subsidencia, la reactivación tectónica y la deposición de minerales, pueden estrechar o incluso cerrar las fracturas.

2. Meteorización: Los procesos de meteorización química y física pueden alterar la composición mineral de las rocas cristalinas, lo que conduce a la formación de poros secundarios. Por ejemplo, la disolución de minerales como el feldespato puede crear espacios porosos dentro de la roca. La meteorización de sulfuros reactivos también puede crear oportunidades para la infiltración y circulación de agua subterránea.

3. Actividad hidrotermal: Los fenómenos hidrotermales pueden incluir la formación de stockworks y brechas alrededor de intrusiones mineralizantes, la formación de minerales de alteración en grandes volúmenes de roca alrededor de fuentes de calor y la disolución o precipitación de minerales. En la medida en que quede espacio abierto después del depósito de minerales que rellenan las vetas, la porosidad secundaria puede persistir tras el cese de la actividad hidrotermal.

Las rocas ígneas no fracturadas que se encuentran en todas las cadenas montañosas del TSCAS se caracterizan por una baja permeabilidad primaria y baja conductividad hidráulica. Sin embargo, estas características pueden variar en muchos órdenes de magnitud debido a los efectos de la porosidad y permeabilidad secundarias generadas por fracturas, diaclasas y fallas. Las rocas carbonatadas, como las calizas, que se encuentran ampliamente en el TSCAS, pueden tener una porosidad y permeabilidad primaria de baja a moderada. Sin embargo, las calizas y dolomitas pueden tener una alta conductividad hidráulica con una disolución química extensa, como la que se encuentra en los paisajes kársticos y cuando están muy fracturadas y falladas. Se pueden encontrar discusiones más detalladas sobre la porosidad y permeabilidad de diversos tipos de rocas en Domenico y Schwartz (1990) y Freeze y Cherry (1979).

7.5.4. Geoquímica de la meteorización

La meteorización de las rocas mineralizadas conduce a la descomposición de los minerales silicatados ígneos y secundarios, así como de los sulfuros. El proceso de meteorización conduce al

transporte acuoso y particulado de los principales elementos formadores de roca (Si, Al, Na, K, Ca, Mg) junto con los metales básicos (Cu, Fe, Zn, Pb, Cd, As, Sb). Los minerales de sulfuro hipogénico (formados a grandes profundidades y expuestos en la superficie a través del levantamiento/erosión) son inestables en presencia de aire y agua en el entorno de meteorización (Rakovan, 2003). En las Montañas Patagonia, las especies de sulfuro más abundantes son la pirita (FeS_2), la calcopirita ($CuFeS_2$) y la esfalerita (ZnS).

Estas son algunas de las reacciones que pueden tener lugar:

1. Oxidación

Las reacciones en la zona de meteorización y justo debajo de ella son complejas. Los sulfuros de metales básicos simples se oxidan a sulfatos (por ejemplo, $ZnS + 2O_{2(aq)} \rightarrow ZnSO_4$). Los sulfatos solubles pueden transportarse en el agua subterránea, excepto cuando se forman sales insolubles, especialmente en presencia de CO_2 o sílice disueltos, por ejemplo, smithsonita ($ZnCO_3$), malaquita ($Cu_2 CO_3 (OH)_2$), azurita ($Cu_3 (CO_3)_2 (OH)_2$), crisocola ($Cu_2 H_2 Si_2 O_5 (OH)_4$) y oxihidróxidos de Fe. La oxidación de FeS_2 y calcopirita ($CuFeS_2$) es más compleja. Para FeS_2, son posibles dos reacciones:

$FeS_2 + 7/2O_{2(aq)} + H_2 O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H+$ (1)

FeS2 + 14Fe3+ + 8H2 O → 15Fe2+ + 2SO42− + 16H+ (2)

(Stumm y Morgan, 1970). La reacción 2 está limitada por la disponibilidad de Fe^{3+} disuelto, que se ve potenciada por la oxidación bacteriana del Fe2+ en entornos subacuáticos, según la reacción

Fe2+ + 1/4O2(aq) + H+ →Fe3+ + 1/2H2 O (3)

La reacción 2 parece predominar en el sur de Arizona, según los valores típicos cercanos a cero de δ18 O en el sulfato supergénico (Gu y Eastoe, 2021). Esta reacción produce abundante ácido. El ácido también puede producirse por la hidrólisis de las sales de sulfato disueltas.

2. Formación de sulfuro supergénico

La reducción de sulfatos también puede producirse en el nivel freático y en sus alrededores, lo que da lugar a la formación de minerales sulfurosos supergénicos como la calcosina (Cu2 S) y la covelita (CuS). Enders (2000) presentó pruebas de que la reducción de sulfatos en Morenci, Arizona, es provocada por bacterias. Cuando hay un nivel freático debajo de la zona de meteorización, la reducción bacteriana de sulfatos en presencia de $CuSO_4$ disuelto puede provocar el depósito de sulfuros de cobre supergénicos como la covelita y la calcosina (Enders, 2000).

En términos generales, la oxidación y la meteorización de los minerales de sulfuro de metales base puede liberar iones metálicos al entorno circundante. Estos metales pueden lixiviarse hacia el suelo y el agua subterránea o superficial, lo que puede generar contaminación potencial y efectos adversos en los ecosistemas y la salud humana. La formación de ácido sulfúrico a partir de la oxidación de los minerales sulfurosos puede contribuir a la generación de drenaje ácido de rocas (ARD, por sus siglas en inglés). El ARD puede tener importantes repercusiones medioambientales, como la acidificación de los cuerpos de agua y la movilización de metales como parte de los procesos naturales de meteorización.

7.5.5. Geología y Geoquímica de las Montañas Patagonia

Para comprender la hidrología y la hidroquímica de las cadenas montañosas, es necesario revisar la información geológica disponible, incluyendo la estructura, historia geológica y distribución de los minerales. La geología de las Montañas Patagonia está dominada por un batolito granodiorítico de edad Laramídica (Vikre et al., 2014) (Figura 7.1). El batolito tiene unos 8 km de ancho en la frontera internacional y se extiende 19 km al norte de la frontera, donde se estrecha y termina contra brechas de intrusión. Estas brechas están compuestas por rocas graníticas y volcánicas mesozoicas y se formaron durante el emplazamiento del batolito. Las rocas encajonantes más antiguas, en las que se emplazó el plutón de granodiorita, incluyen monzonita de cuarzo con biotita y diorita con hornblenda del Precámbrico, en el lado este de la cordillera, junto con biotita-hornblenda, monzonita de cuarzo y gabro con hornblenda del Precámbrico a lo largo del lado oeste. Las rocas sedimentarias paleozoicas, con edades que van desde el Cámbrico Medio hasta el Pérmico Temprano, están presentes en dos áreas del lado este de la cordillera. Estas rocas representan entornos marinos cercanos a la costa. Las rocas mesozoicas, principalmente volcánicas silíceas del Triásico al Jurásico, se cubren discordantemente a las unidades paleozoicas.

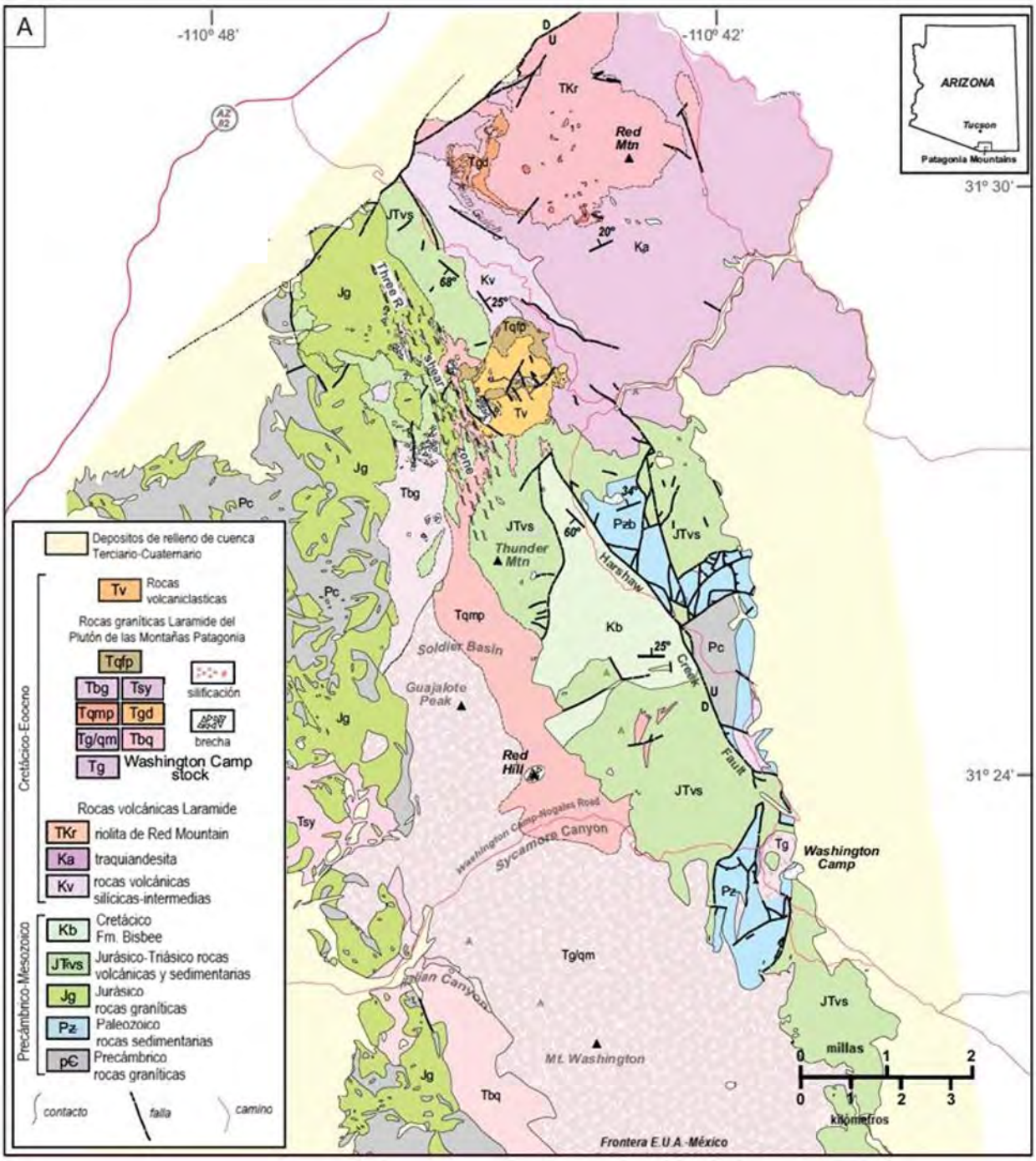


Figura 7.1 Geología de las Montañas Patagonia tomada de Vikre et al. (2014). Mapa geológico de las Montañas Patagonia, condado de Santa Cruz, Arizona.

Las rocas graníticas Laramídicas incluyen Tqfp (pórfido de cuarzo y feldespato) en Sunnyside, Tbg (granodiorita de biotita), Tsy (sienodiorita), Tqmp (monzonita de cuarzo y pórfido de monzonita cuarzosa), Tgd (granodiorita) de Red Mountain, Tg (granodiorita) de Washington Camp, que también incluye granodiorita biotítica porfídica, y Tbq (pórfido de monzonita de cuarzo con biotita). Las rocas volcánicas laramídicas incluyen TKr (riolita) de Red Mountain, Ka (traquandesita) y Kv (rocas volcánicas intermedias silíceas, incluida latita con biotita.

Las rocas del Mesozoico tardío son predominantemente ígneas e incluyen tobas y coladas volcánicas intermedias a félsicas y rocas intrusivas (Vikre et al., 2014). En el Cretácico tardío se produjo una deposición generalizada de rocas volcánicas con menor proporción de rocas sedimentarias. El vulcanismo continuó hasta principios del Terciario (Paleoceno) con la deposición de lava y toba andesítica a riolítica, y conglomerado volcaniclástico. Gran parte de la mineralización observada en las Montañas Patagonia y en el sector sur de la cordillera de Santa Rita, al norte, se produjo durante el magmatismo del Cretácico tardío-Terciario temprano, como el que se encuentra en Red Mountain (ver Figura 7.1). La presencia de una sección de gran espesor de rocas sedimentarias y volcánicas del Cretácico al Terciario en el extremo norte de las Montañas Patagonia, así como la mayor anchura de la intrusión expuesta hacia el sur a lo largo de la frontera entre Estados Unidos y México, sugiere que el área meridional podría estar más erosionada en profundidad que las exposiciones ubicadas más al norte. El levantamiento, acompañado y seguido por la deposición de fanglomerados, conglomerados y extensos aluviones, caracterizó la orogenia de la cuenca y la cordillera y dio lugar al paisaje actual. Desde la frontera oriental del área de estudio hasta el pueblo de Patagonia, el valle del arroyo Sonoita se asienta sobre un aluvión predominantemente del Pleistoceno al Plioceno (Drewes, 1980), compuesto por cantos rodados, grava, arena, limo y arcilla poco consolidados. Esta unidad se conoce comúnmente como “relleno de cuenca”. Al suroeste de Patagonia, el valle se localiza dentro de una estructura tipo graben con orientación suroeste, con sedimentos moderadamente consolidados de edad pleistocénica a miocénica, subyacidos por una mezcla de flujos volcánicos, tobas y sedimentos volcaniclásticos de edad terciaria a cretácica, cuya composición varía desde andesita hasta riolodacita y riolita. El material aluvial reciente, principalmente arenas y gravas, aflora en el cauce activo del arroyo.

En las elevaciones más bajas entre las Montañas Patagonia y Santa Rita, el basamento rocoso está cubierto y localmente intercalado con depósitos aluviales de arena y grava. Estos sedimentos de relleno de cuenca bordean la zona, generalmente en contacto deposicional con el basamento rocoso, pero localmente se encuentran fallados directamente contra unidades de basamento más antiguas, como ocurre al pie de las Montañas Patagonia, al sur del poblado de Patagonia (Drewes, 1972a, b). Los depósitos más jóvenes, pobremente consolidados y de textura más fina, compuestos por arenisca limosa con guijarros intercalados y gravas arenosas con guijarros, constituyen los afloramientos dominantes en la cuenca principal del arroyo Sonoita. En las partes más profundas de la cuenca, los sedimentos son típicamente conglomerados arenosos de grano medio (guijarros y cantos rodados) con arenisca con guijarros intercalada localmente, y pueden estar moderadamente consolidados en la base. La cementación local y la coloración rojiza de los depósitos aluviales aumentan con la proximidad a la zona de falla de Patagonia y parecen representar una alteración diagenética relacionada con el óxido de hierro.

Las interpretaciones estructurales y los datos geofísicos sugieren que la cuenca del arroyo Sonoita es un sistema de graben complejo y estrecho, delimitado al norte y al sur por fallas normales de gran inclinación (Menges, 1981). Menges (1981) presentó una recopilación de datos geofísicos regionales y datos estructurales detallados sobre la cuenca y la configuración de la cordillera del valle del arroyo Sonoita, en los alrededores de Patagonia. Las interpretaciones de la geometría de la falla Patagonia realizadas por Menges (1981) fueron particularmente útiles para identificar algunas de las principales características que causan los controles estructurales en la hidrología de la roca subyacente. En el lado sur del sistema de cuencas, la falla Patagonia forma el límite abrupto entre los sedimentos de la cuenca y las rocas ígneas del principal sistema montañoso (Menges, 1981). En este contacto, los sedimentos de la cuenca quedan expuestos a una altura de hasta 210 m sobre el fondo del valle. Al norte, en el lado de la fosa tectónica de Santa Rita, la roca subyacente aparece abruptamente a lo largo de estructuras de fallas ocultas a lo largo de las orillas del arroyo Sonoita, en las elevaciones más bajas del valle. Esta configuración geológica del margen de la cuenca tiene implicaciones en los controles de la geoquímica del sistema de aguas subterráneas.

Mineralización hidrotermal y exploración geoquímica

Entre los estudios que han resultado especialmente útiles para esta investigación se encuentra la recopilación geológica y de yacimientos minerales realizada por Schrader (1915). Chatman (1994) y Keith (1975) también publicaron extensos resúmenes de las explotaciones mineras de la zona. La información y las interpretaciones geológicas modernas incluyen a Drewes (1971; 1972 a, b; 1980), Simons (1971; 1974) y du Bray, (1996). La información publicada por Corn (1975), relevante para este estudio y relacionada con la mineralización, detalla la alteración y mineralización presentes en el yacimiento de pórfido de Red Mountain (Chaffee, 2020). Otros estudios sobre los yacimientos de pórfido locales y sistemas relacionados incluyen Graybeal (1984) y Graybeal (1996). Chaffee et al. (1981) definieron de manera general la firma geoquímica de las rocas dentro de los sistemas de pórfidos de la zona, utilizando análisis geoquímicos de sedimentos fluviales. El USGS llevó a cabo una evaluación integral de los recursos minerales del Bosque Nacional Coronado (du Bray, 1996), que incluyó las Montañas Patagonia y la cuenca hidrográfica del arroyo Harshaw. La evaluación se realizó para ayudar al Servicio Forestal de los Estados Unidos a cumplir con los requisitos del título 36, capítulo 2 y parte 219.22 del Código de Regulaciones Federales, que exige al Servicio Forestal de los Estados Unidos proporcionar información e interpretaciones para que los recursos minerales puedan considerarse junto con otros tipos de recursos en la planificación del uso del suelo. Graybeal et al. (2015) y Vikre et al. (2014) presentaron una cronología de múltiples episodios de mineralización importantes para comprender la sobreimposición química en la geología encajonante de esta porción de las tierras altas cristalinas y los acuíferos de roca dura del TSCAS.

Además de los numerosos estudios geoquímicos interpretativos en áreas seleccionadas dentro y cerca del Bosque Nacional Coronado, el USGS llevó a cabo un amplio estudio geoquímico interpretativo regional (Chaffee, 1990). Este estudio formaba parte de una evaluación preliminar de los recursos minerales de los cuadrantes de 1° x 2° de Tucson y Nogales (Peterson, 1990) y se basa íntegramente en una recopilación de datos geoquímicos obtenidos de otros estudios. En 1996, el USGS publicó un estudio en el que se evaluaban los recursos minerales de las zonas del Bosque Nacional Coronado, en el sureste de Arizona, que incluye gran parte de las Montañas Patagonia (du Bray, 1996). Se examinaron compilaciones de datos geológicos, geoquímicos y geofísicos para determinar el potencial alto, moderado y bajo de los recursos minerales como apoyo a la planificación y gestión futura del uso del suelo. Lecumberri-Sánchez et al. (2013) proporcionaron una distribución espacial tridimensional temporal y detallada de la mineralización y la alteración en Red Mountain, en el norte de las Montañas Patagonia. Las publicaciones más recientes, y posiblemente las más relevantes para el presente estudio, son las de Chaffee (2020) y Horton et al. (2020), que informaron de los resultados de los análisis geoquímicos de más de 1000 muestras de diversos tipos, incluyendo núcleos de perforación, rocas, suelos y varias especies vegetales. Las muestras se recolectaron en Red Mountain y sus alrededores, un yacimiento de cobre y molibdeno porfídico sin explotar (yacimiento Cu-Mo). Estos últimos estudios utilizaron núcleos de perforación para perfilar la química y mineralogía de las rocas del subsuelo profundo de la cordillera.

Las lecciones relevantes de estos estudios previos en las Montañas Patagonia y sus alrededores incluyen: 1) los fluidos hidrotermales asociados al emplazamiento de magmas granitoides han depositado concentraciones de sulfuros de metales básicos (vetas, reemplazos y diseminaciones) dentro de una amplia zona de roca encajonante alterada hidrotermalmente que también contiene metales básicos diseminados (por ejemplo, hierro, níquel, plomo, zinc, cobre) y minerales de sulfuro, 2) la roca encajonante alterada puede influir considerablemente en el flujo de agua subterránea, ya que la alteración modifica las propiedades hidráulicas de la roca, y 3) la roca encajonante influye en la química y la calidad del agua al actuar como una fuente de gran volumen de posibles contaminantes.

7.5.6. Hidrología y Ecología: Estudios Previos

Solo hay un pequeño conjunto de estudios que se refieren directamente a los aspectos geoquímicos, medioambientales e hidrológicos de la zona (Gray et al., 1998; Brady et al., 2001; Gray et al., 2004; Balistrieri et al., 2007; Norman et al., 2008; Eddleman, 2012). Sin embargo, los resultados de estos estudios permiten comprender la naturaleza de la geoquímica tridimensional del subsuelo que alberga estos extensos, pero poco conocidos sistemas acuíferos de las tierras altas. Estos estudios ayudan a comprender los controles que ejerce la geología de los depósitos minerales sobre la calidad del agua subterránea y el drenaje superficial.

Entre los estudios que incluyen análisis de calidad de agua y caracterización ambiental de la calidad y ecología de los arroyos en las Montañas Patagonia se

encuentran los de Dean (1982) y Hyde (1995). Gray et al. (2000) presentaron los resultados del análisis de la relación entre el entorno geohidrológico y la distribución de metales, y compararon los eventos estacionales de tormentas con los flujos de concentraciones de metales en la región. Brady et al. (2000) discutieron los criterios para un análisis basado en SIG de la erosión del suelo y presentaron modelos de los efectos geoquímicos de la erosión de los residuos mineros en varias cuencas hidrográficas de la zona. Gu (2005) y Gu et al. (2008) analizaron el uso de isótopos estables para comprender las fuentes de los aportes que afectan la calidad del agua en varias cuencas hidrográficas de las Montañas Patagonia, concretamente en el arroyo Harshaw y Alum Gulch. Eddleman (2012) investigó las relaciones químicas entre las plantas acuáticas y el suelo en los arroyos afectados por la minería en la zona de estudio y evaluó los niveles de bioabsorción de metales causados por el drenaje ácido en la zona. Balistrieri et al. (2007) analiza la comprensión de las fuentes y vías de los metales en los ecosistemas mineralizados, incluidas las Montañas Patagonia y el sur de las Montañas Santa Rita. La interacción a escala del paisaje más significativa observada entre el agua subterránea somera a profunda y el agua superficial relacionada es la neutralización de la acidez, donde el agua subterránea fluye desde rocas silicatadas intensamente mineralizadas y generadoras de ácido en el centro de las Montañas Patagonia a través de la falla del arroyo Harshaw hacia carbonatos paleozoicos que absorben el ácido.

7.6. Geoquímica de las Tierras Bajas: Resumen y Revisión de Datos

En la siguiente sección se presenta un resumen de la información seleccionada sobre calidad de agua (parámetros fisicoquímicos y iones principales) para los acuíferos de las tierras bajas del TSCAS. Los sitios seleccionados con datos relevantes sobre calidad de agua se pueden encontrar en la Figura 7.2. Se proporciona una revisión adicional de los datos y publicaciones seleccionados relativos a la PITAR, la microbiología y los compuestos orgánicos.

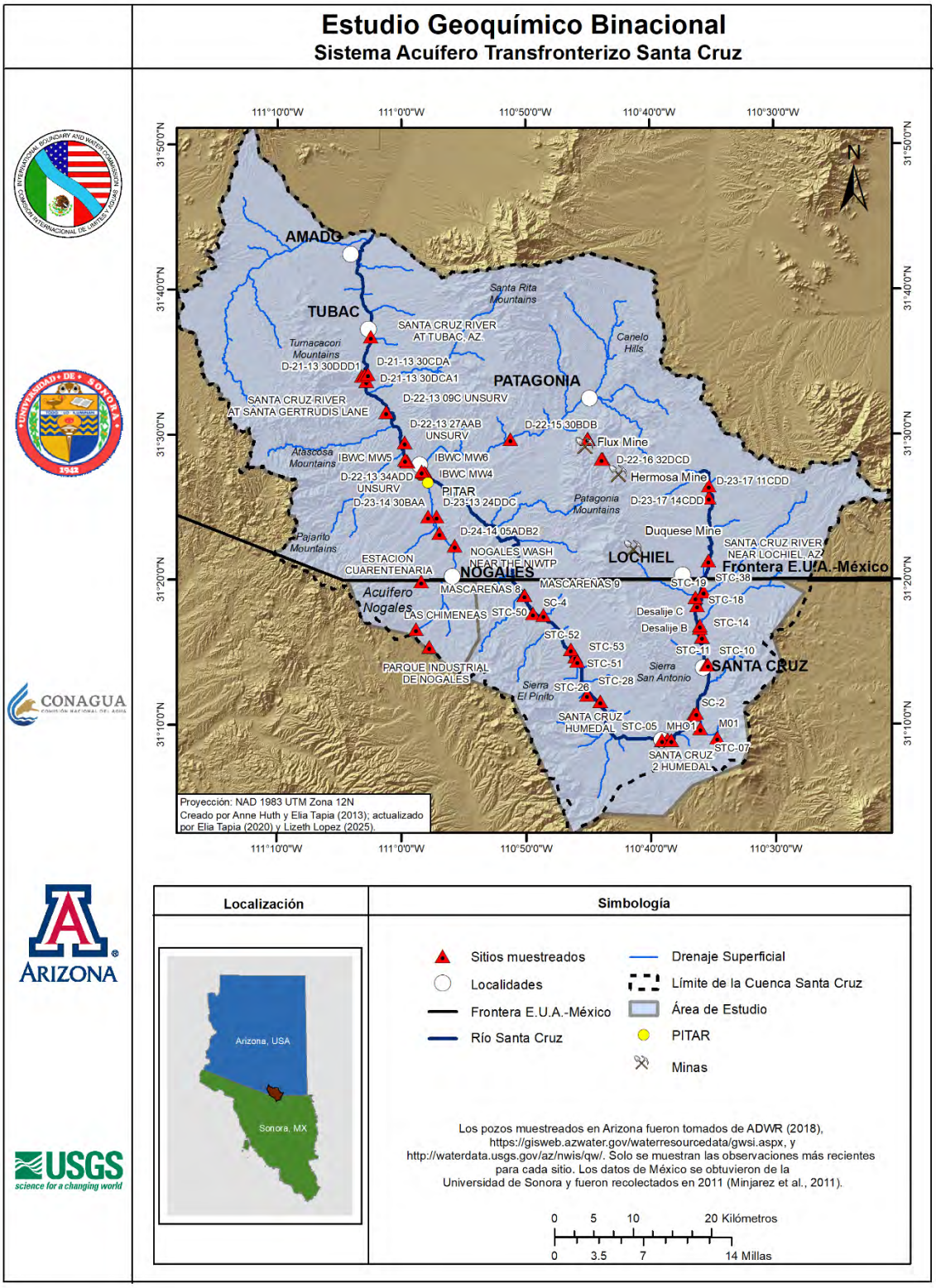


Figura 7.2 Estudio geoquímico binacional en el TSCAS.

7.6.1. Temperatura

La temperatura del agua subterránea puede utilizarse como indicador de procesos hidrológicos tales como la recarga, la descarga y el intercambio entre el agua subterránea y el agua superficial (Blasch et al., 2007; Anderson, 2005). La temperatura del subsuelo generalmente aumenta con la profundidad, un fenómeno conocido como gradiente geotérmico. La provincia de Sierras y Valles (Basin and Range) tiene gradientes geotérmicos relativamente altos, con valores de temperatura en los pozos de agua subterránea que oscilan entre 0.47 y 0.6 °C por cada 30 m (Keys, 1990). Las temperaturas del agua en los pozos poco profundos de la provincia de Sierras y Valles (Basin and Range), en el suroeste de Arizona, han mostrado gradientes geotérmicos anormalmente altos. En el condado de Santa Cruz, dicho gradiente ha registrado 66 °C por kilómetro (Giardina y Conley, 1978). Cerca de la superficie, el gradiente geotérmico puede verse modificado por la infiltración de agua superficial, lo que puede transmitir señales térmicas estacionales (Dowman et al., 2003). La temperatura también afecta a la velocidad de las reacciones químicas y los procesos biológicos. Por esta y otras razones, es un parámetro común que se mide en las aguas subterráneas y superficiales. La Figura 7.3 muestra la variabilidad espacial de la temperatura de las aguas subterráneas y superficiales en el TSCAS. Como se muestra en la figura, la temperatura del agua subterránea oscila entre 16 y 28 °C.

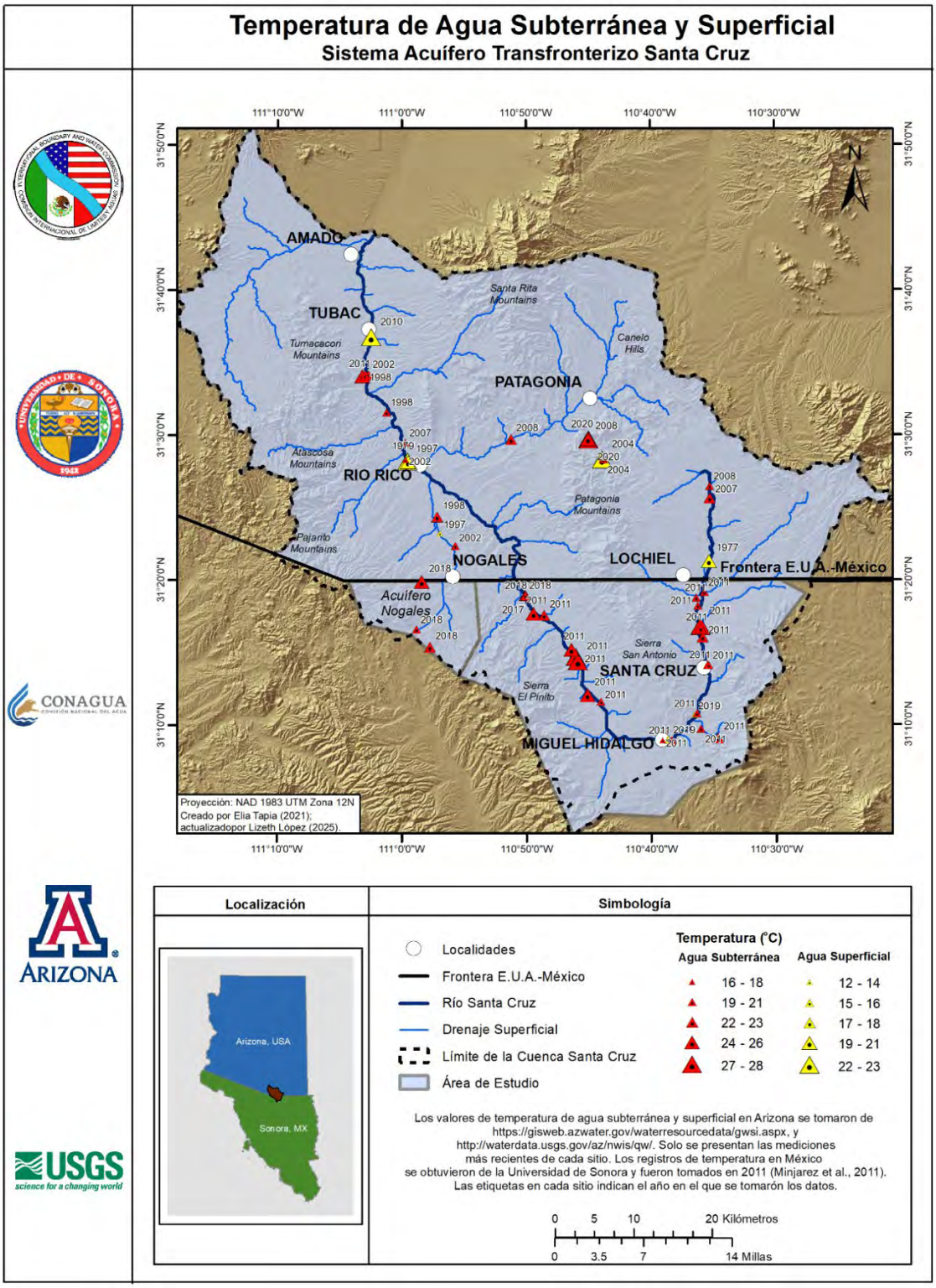


Figura 7.3 Temperatura de agua subterránea y superficial en el TSCAS.

7.6.2. pH

El pH de una solución indica la concentración efectiva de iones de hidrógeno. Normalmente se determina sobre el terreno, ya que el tiempo, la exposición al aire y los cambios de temperatura después de la toma de muestra pueden alterar el pH de la muestra. El pH está determinado y se ve influenciado por múltiples procesos químicos, como la interacción entre el agua y las rocas y el ciclo biogeoquímico de los nutrientes. Por lo tanto, es un parámetro importante que hay que medir, ya que influye en la química del agua y determina la presencia y la concentración de diferentes componentes en una solución. El pH 7.0 es neutro; los valores por encima o por debajo de este se consideran indicativos de condiciones ácidas (menos de 7) o alcalinas (más de 7). Tanto la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) como la Secretaría de Salud de México regulan el pH del agua potable para que se encuentre en el rango de 6.5 a 8.5 (EPA, 2024; NOM-127-SSA1-2021). Según este criterio, se considera que el agua es ácida cuando su pH es inferior a 6.5 y alcalina cuando es superior a 8.5. En Estados Unidos, los valores de pH en agua subterránea suelen oscilar entre 6.5 y 8.5 (Hem, 1985). La Figura 7.4 muestra la variabilidad espacial del pH del agua subterránea y superficial en el TSCAS, que oscila entre 2.7 y 8.7. El pozo con el pH más alto es Nogales Wash, cerca de la PITAR, situada al norte de la frontera entre Estados Unidos y México, mientras que el pozo con el pH más bajo es D-22-16 30ACB1 [REEF MINE SEEP], situado en las Montañas Patagonia, al sur del poblado de Patagonia.

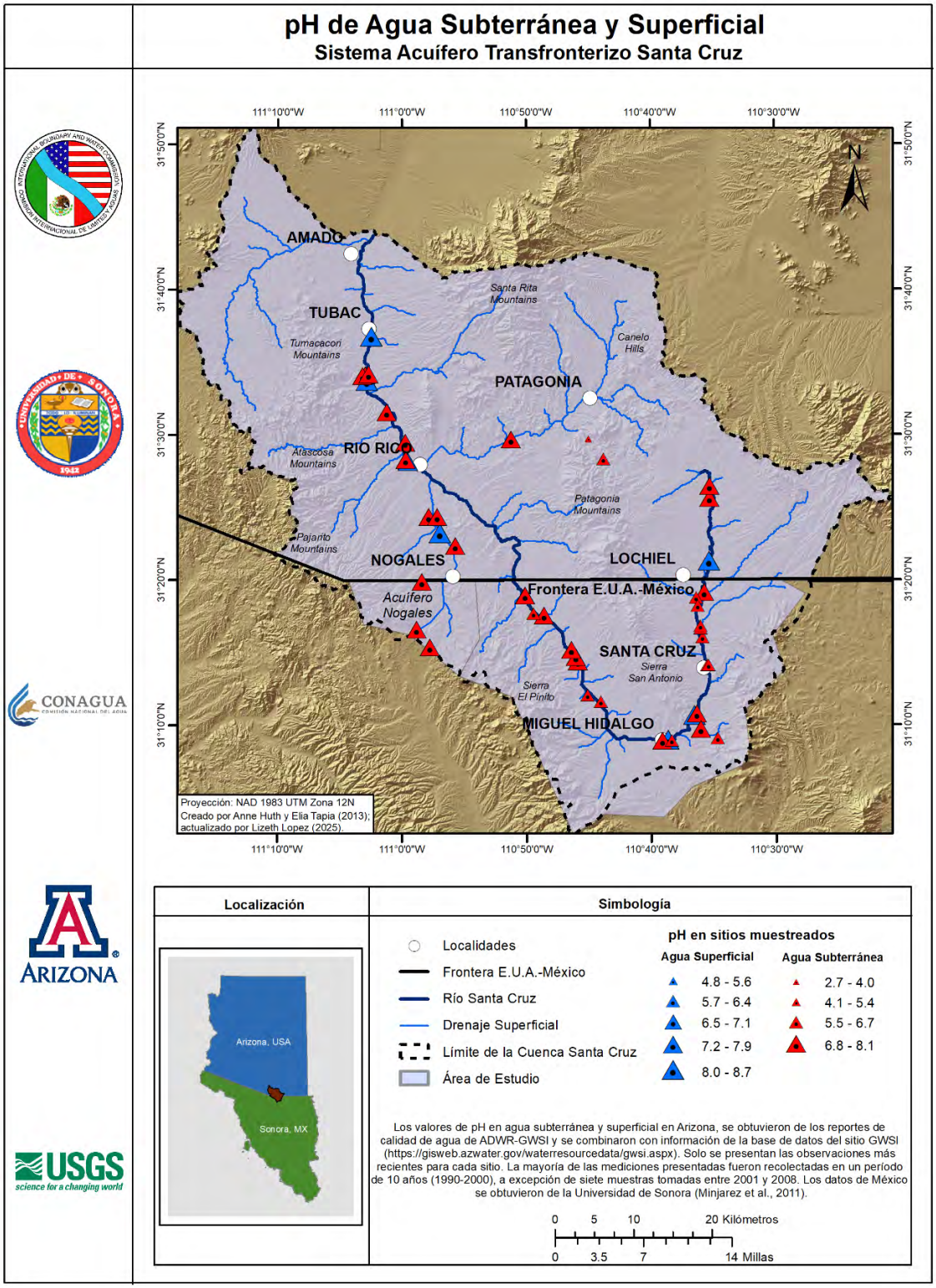


Figura 7.4 pH del agua subterránea y superficial en el TSCAS.

7.6.3. Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos mediante su reacción con carbonato, bicarbonato y otros iones (Hem, 1985). El ácido carbónico y sus iones constituyen uno de los principales contribuyentes a la alcalinidad (regulación del pH) en muchos entornos naturales. Las concentraciones de las formas carbonatadas en solución acuosa varían con el pH (Hem, 1985). La alcalinidad es importante para comprender la química de las aguas naturales, ya que está influenciada por las interacciones entre el agua y las rocas, y para la salud y el mantenimiento del hábitat acuático. La alcalinidad se debe principalmente a la disolución del dióxido de carbono, ya sea de la atmósfera o del suelo. El dióxido de carbono en el suelo proviene de la respiración de las plantas y de la oxidación de la materia orgánica (Hem, 1985). La Figura 7.5 muestra la variabilidad espacial de la alcalinidad de las aguas subterráneas y superficiales en el TSCAS. Los valores de alcalinidad de las aguas subterráneas y superficiales oscilan entre 100 y 294 mg/L. Los pozos con los valores más altos se encuentran en la parte mexicana del área de estudio.

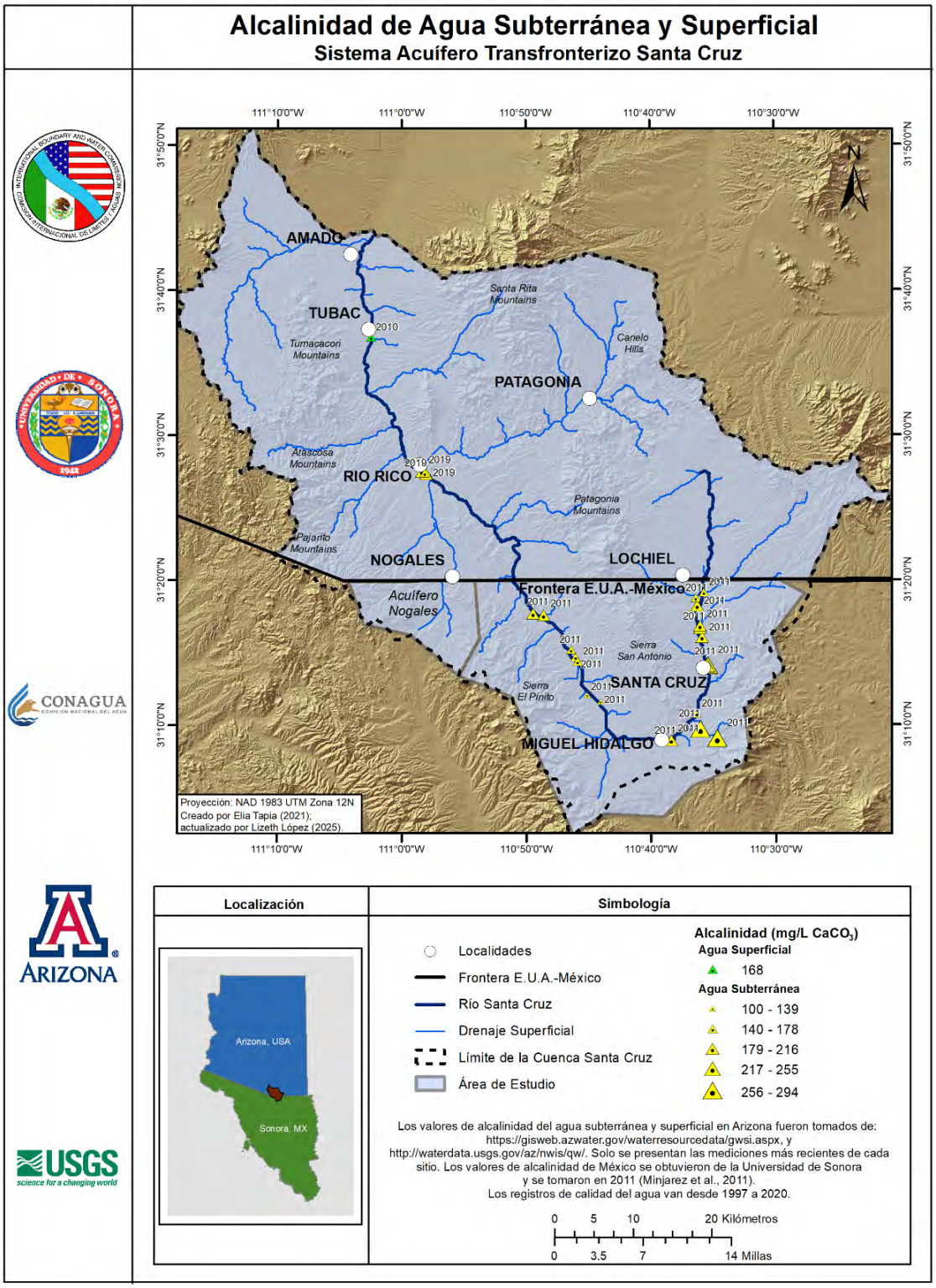


Figura 7.5 Alcalinidad de agua subterránea en el TSCAS.

7.6.4. Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE), también denominada conductancia específica (CS), es una medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es un indicador de la concentración total de iones y sirve como un indicador útil de la concentración de sólidos totales disueltos (TDS) (Hem, 1985). Las concentraciones de TDS se determinan mejor mediante análisis químicos en laboratorios; sin embargo, los medidores de conductividad de campo permiten estimar los TDS. Las unidades de CS en el agua se expresan comúnmente en microSiemens por centímetro (µS/cm), mientras que las concentraciones de TDS se expresan típicamente en miligramos por litro (mg/L). Los dos métodos proporcionan información similar. En este informe se utiliza CS en todo momento para facilitar la comparación de los conjuntos de datos de cada país. Las mediciones anteriores de TDS se han convertido a CS utilizando la siguiente aproximación: 1.0 mg/L de TDS ≃ 0.67 µS/cm de SC (Weiner, 2012).

El TDS y el CS se utilizan a menudo como indicadores de primera línea de la calidad del agua. El TDS es la suma de todos los componentes disueltos en una muestra (Drever, 1997) y, como tal, es importante por múltiples razones, entre ellas el sabor (está regulado como norma secundaria para el agua potable por la EPA), los posibles efectos sobre la salud acuática y la salinización del suelo (Terrell y Perfetti, 1989; EPA, 2024). Se asume que un tiempo de residencia prolongado del agua en el subsuelo aumenta las concentraciones de sólidos disueltos al disolver los minerales durante el transporte, y que puede producirse una reducción de las concentraciones mediante la dilución por agua meteórica u otras reacciones químicas (como la precipitación química) a lo largo de las vías de flujo de las aguas subterráneas (Pool y Coes, 1999).

En la parte de Arizona del Valle San Rafael, los valores de CS en agua subterránea oscilaron entre 293 y 1637 µS/cm, con un promedio de 540 µS/cm (ADEQ, 2003). En el estudio realizado por ADEQ (2003) en el valle de San Rafael, el TDS de las aguas subterráneas osciló entre 185 y 1070 mg/L. La conductividad específica del agua superficial del Río Santa Cruz era de 314 µS/cm en Lochiel (ADEQ, 2003). En la parte mexicana del acuífero Río Santa Cruz, la conductividad específica oscilaba entre 80 y 1390 µS/cm (CONAGUA, 2009). Datos adicionales indicaron que los valores de CS oscilaron entre 258 y 698 µS/cm en la parte mexicana del acuífero (Minjarez et al., 2011). Los pozos con los valores más altos de CS se encontraban en Cañada la Piedra y en la localidad de Santa Cruz, Sonora (Figura 7.6). El pozo con la CS más baja, 258 µS/cm, se encontraba en el Ejido Miguel Hidalgo, en el lado oeste del acuífero Río Santa Cruz (Figura 7.6). La dureza en el acuífero Río Santa Cruz variaba entre 21 mg/L y 632 mg/L, y el 83% de los pozos tenían concentraciones inferiores a 200 mg/L. El 17% restante tenía una dureza superior a 200 mg/L (CONAGUA, 2024). La CS aumentó gradualmente aguas abajo de la frontera internacional, con un aumento brusco aguas abajo de la PITAR en Río Rico (Figura 7.6).

En el estudio realizado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS) (2008)

en el acuífero Río Santa Cruz, el TDS osciló entre 40 y 690 mg/L. En el estudio de las aguas subterráneas realizado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) (2001) en el acuífero de Nogales a lo largo del arroyo Nogales, la conductividad específica (CS) osciló entre 121 y 845 µS/cm. En el estudio realizado en 1998 por el USGS y la ADEQ en la cuenca alta de Santa Cruz, el CS osciló entre 240 y 1300 µS/cm, y el TDS entre 120 y 890 mg/L. La Figura 7.6 muestra la variabilidad espacial de CS de las aguas subterráneas y superficiales en el TSCAS. Los valores de CS de las aguas subterráneas oscilan entre 250 y 3420 µS/cm. El pozo con el valor más alto es el D-22-16 30ACB1, situado al norte de las Montañas Patagonia.

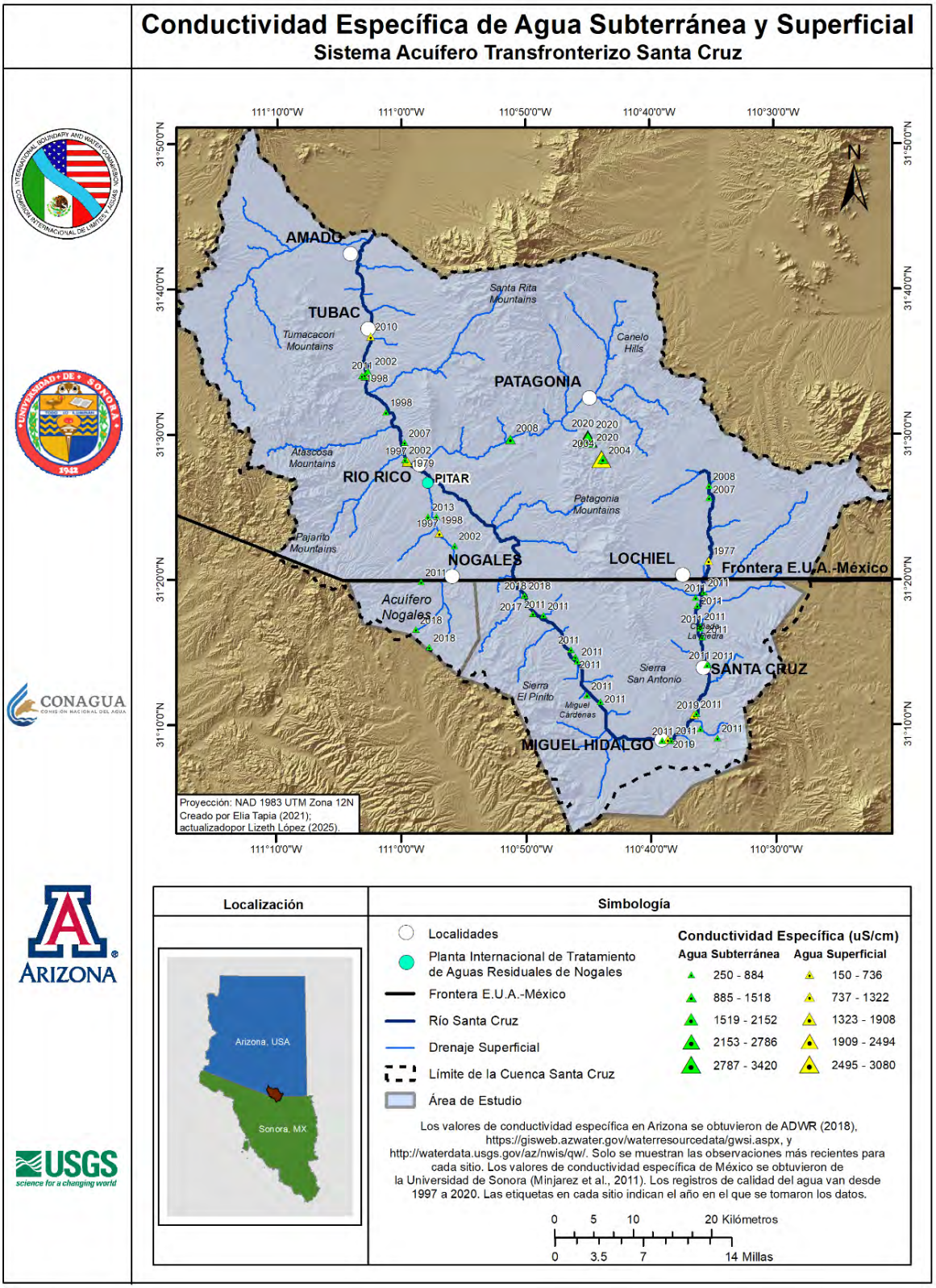


Figura 7.6 Conductividad específica en el TSCA

7.6.5. Iones Principales

En este estudio, los iones principales incluyen sodio, calcio, magnesio, potasio, bicarbonato, sulfato y cloruro. La Tabla 7.4 muestra las concentraciones máximas y mínimas encontradas en el TSCAS, junto con el LMP (Límite Máximo Permisible, MCL por sus siglas en inglés) y una descripción de dónde se encontraron las concentraciones máximas. Además, las Figura 7.7-Figura 7.13 muestran la distribución geográfica de los iones principales dentro del TSCAS. Los datos sobre los iones principales para la parte estadounidense se obtuvieron del estudio del Programa de Monitoreo Ambiental de Aguas Subterráneas del Departamento de Calidad Ambiental de Arizona (ADEQ) realizado entre 2000 y 2002 en la cuenca de aguas subterráneas San Rafael (Towne, 2003), mientras que la información mexicana se recopiló en 2011 (Minjarez et al., 2011).

Tabla 7.4 Iones principales y MCL en el TSCAS.

Iones principales	Concentración mínima de (mg/L)	Concentración máxima (mg/L)	MCL (mg/L)	Observaciones
Sodio	0,01	169	200 mg/L (NOM-127-SSA1-1994)	Concentración máxima localizada al sur de la ciudad de Tubac, Estados Unidos, y las Montañas Tumacácori, en el pozo D-21-13 30DD1
Calcio	0,01	541	N.A.	Concentraciones máximas encontradas en el pozo D-22-16 32DCD en las Montañas Patagonia, Estados Unidos.
Magnesio	0,01	275	N.A.	Concentraciones máximas localizadas cerca del pueblo de Patagonia, Estados Unidos.
Bicarbonato	122	359	50 y 350 mg/L (Custodio y Llamas, 1996)	Concentración máxima encontrada en la localidad de Santa Cruz, México.
Potasio	0,01	9,91	10 (Custodio y Llamas, 1996)	Concentración máxima encontrada en el pozo del Río Santa Cruz NR Río Rico Arizona, Estados Unidos.
Cloruro	0,01	200	250 (EPA y NOM-127-SSA1-1994)	Concentraciones máximas localizadas al sur de Tubac, Estados Unidos, y cerca de las Montañas Tumacácori.
Sulfato	0	2580	250 (EPA) 400 (NOM-127-SSA1-1994 y NOM-127-SSA1-2021)	Concentraciones máximas situadas al este de la localidad de Miguel Hidalgo, en México.

Sodio

El sodio (Na) en las aguas subterráneas proviene de las precipitaciones, de las interacciones entre el agua y las rocas ígneas, o de la contaminación urbana e industrial (Custodio y Llamas, 1996). El sodio forma parte del grupo de los metales alcalinos, junto con el litio, el potasio, el rubidio y el cesio; la fuente más común es la meteorización de los feldespatos. La halita (NaCl), presente en las zonas de evaporación del relleno de la cuenca, puede provocar un aumento en las concentraciones de sodio disuelto. La concentración máxima de sodio permitida por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) es de 200 mg/L. La CONAGUA (2024) encontró concentraciones de sodio que oscilaban entre 5 y 81 mg/L. La Figura 7.7 muestra la variabilidad espacial de las concentraciones de sodio en las aguas subterráneas y superficiales en el TSCAS. Los valores de concentración de sodio en las aguas subterráneas y superficiales oscilan entre 0.01 y 169 mg/L, y el valor más alto se encontró en el pozo D-21-13 30DCA1.

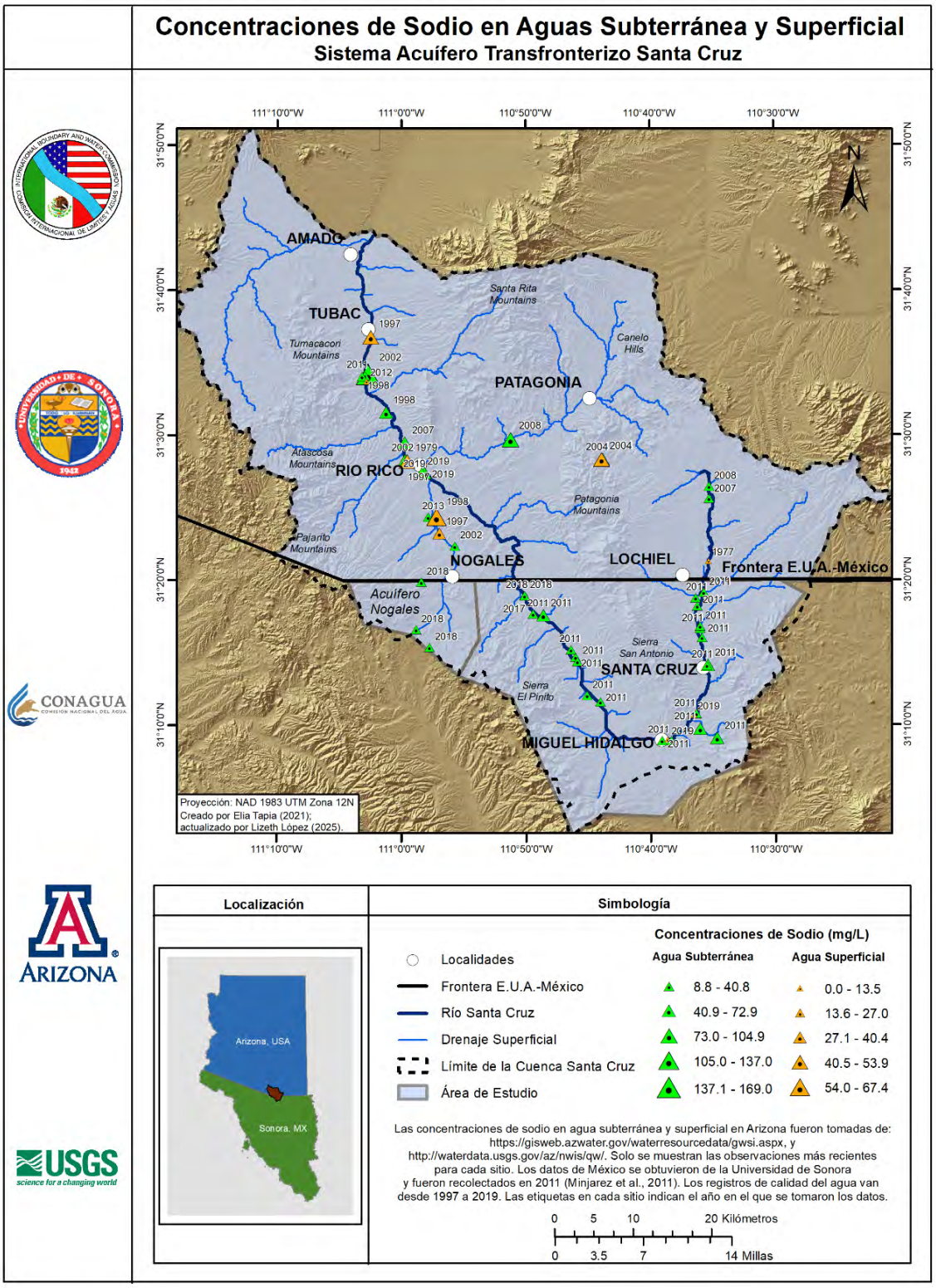


Figura 7.7 Variabilidad espacial de las concentraciones de sodio en agua subterránea y superficial en el TSCAS.

Calcio

El calcio (Ca) en las aguas subterráneas suele proceder de minerales aluminosilicatados de ocurrencia común que forman parte del entorno geológico, de los que es uno de los principales componentes (Hem, 1985). El yeso y la anhidrita, aunque se limitan a las playas o evaporitas en las zonas más amplias de la cuenca superior de Sonoita, son fuentes importantes de calcio. La meteorización de la plagioclasa y la disolución de la calcita y las calizas dolomíticas son fuentes comunes de calcio, especialmente cerca de las Canelo Hills. Los minerales ferromagnesianos, los piroxenos y los anfiboles, son también fuentes menores que se encuentran en toda la cuenca. La Norma Oficial Mexicana no establece un límite máximo para el calcio, pero las concentraciones típicas en el agua potable pueden alcanzar los 250 mg/L (Custodio y Llamas, 1996). La CONAGUA (2024) encontró que el calcio oscilaba entre 5 y 188 mg/L, lo que se considera tolerable para el uso y consumo humano. La Figura 7.8 muestra la variabilidad espacial de las concentraciones de calcio en las aguas subterráneas y superficiales del TSCAS. Las concentraciones de calcio en las aguas subterráneas y superficiales oscilan entre 0.01 y 541 mg/L. Los valores más altos se encontraron en dos sitios D-22-13 34ADD UNSURV y Alum Gulch en January Adit, al norte de las Montañas Patagonia.

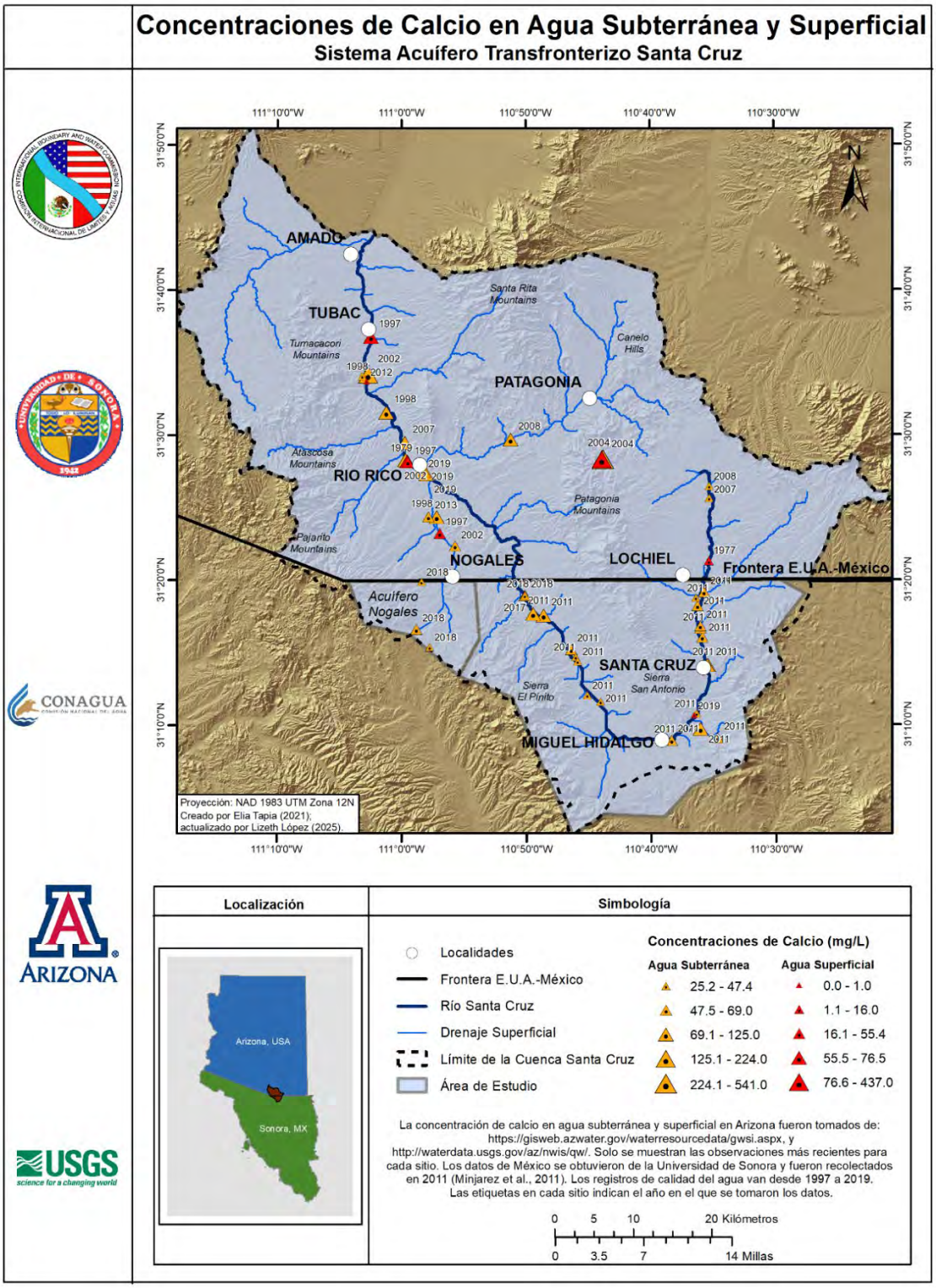


Figura 7.8 Variabilidad espacial de las concentraciones de calcio en agua subterránea y superficial del STSCAS.

Magnesio

El magnesio (Mg) es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre (Lide, 2005). Forma parte tanto de las rocas sedimentarias como de las ígneas, y su función química en el medio ambiente tiene algunas características en común con el calcio. Sin embargo, en las rocas ígneas primarias, el magnesio se comporta más como el hierro o el manganeso que como el calcio (Rankama y Sahama, 1950). La principal fuente de magnesio en las aguas subterráneas suele ser la disolución de la dolomita y la caliza dolomítica (Custodio y Llamas, 1996), aunque se desconoce si ese es el caso en el TSCAS. Otras fuentes menores son los minerales ferromagnesianos de los grupos piroxeno y anfíbol.

La NOM mexicana y la EPA no establecen un límite máximo permisible de magnesio para el uso y consumo humano, ya que no se considera peligroso para la salud humana. Sin embargo, puede tener un efecto laxante cuando se mezcla con sulfatos. Otro inconveniente de este elemento es que, las altas concentraciones pueden formar precipitados en tuberías y calderas. La CONAGUA (2024) encontró que las concentraciones de magnesio oscilaban entre 1 y 31 mg/L. La Figura 7.9 muestra la variabilidad espacial de las concentraciones de magnesio en las aguas subterráneas y superficiales del TSCAS. Los valores de concentración de magnesio en las aguas subterráneas y superficiales oscilan entre 0.01 y 275 mg/L. Los valores más altos se encontraron en los pozos D-22-16 32DCD y Alum Gulch en January Adit, al norte de las Montañas Patagonia.

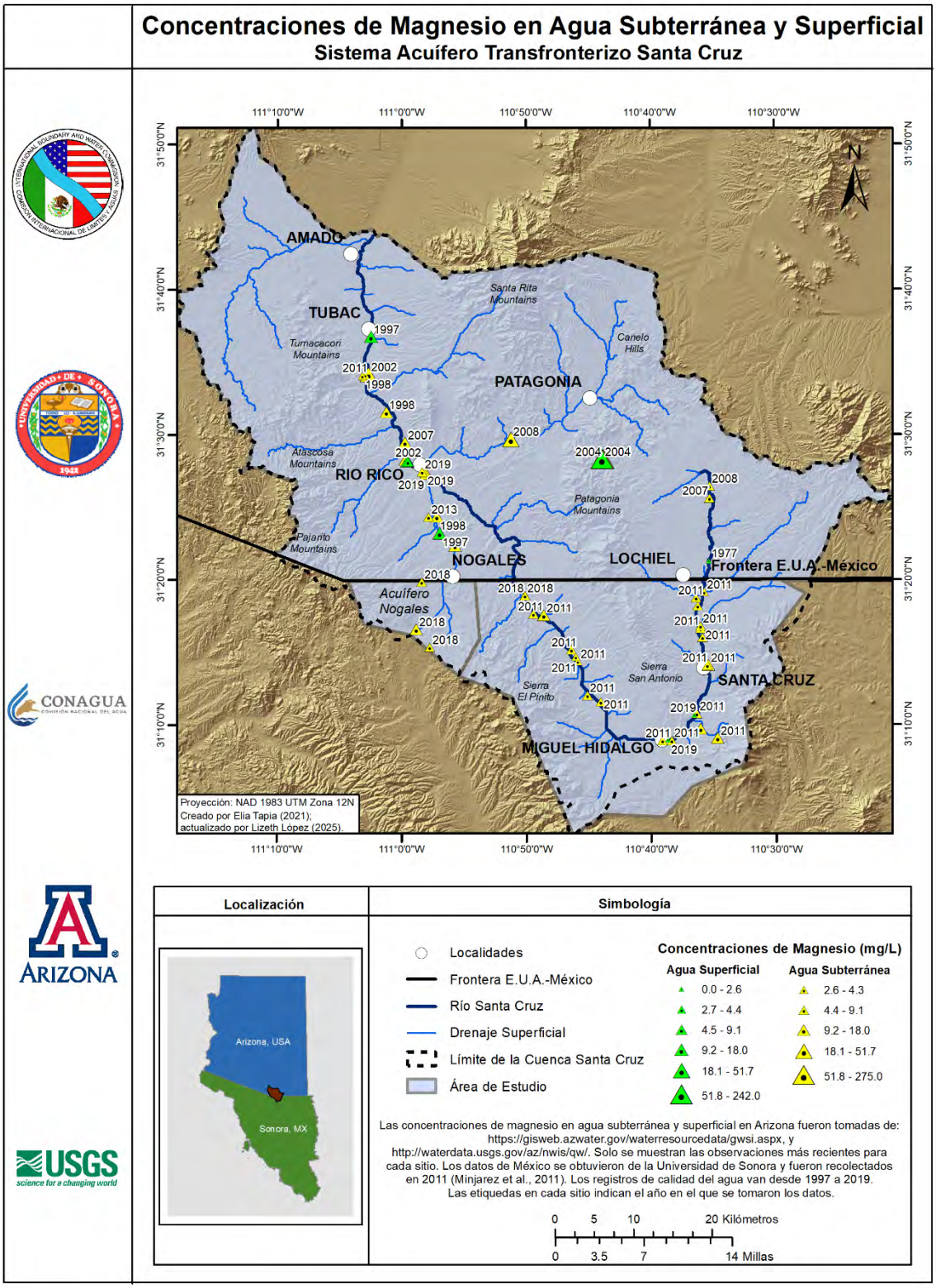


Figura 7.9 Variabilidad espacial de las concentraciones de magnesio en agua subterránea y superficial del TSCAS.

Bicarbonato

Las fuentes naturales primarias de bicarbonato en el agua son la actividad biológica en los suelos (que produce dióxido de carbono capaz de disolverse en el agua) y la disolución del carbonato cálcico (en rocas o suelos) (Hem, 1985). Es la forma ionizada dominante del ácido carbónico entre pH 6 y 8.

No existe ninguna norma oficial mexicana ni norma de la EPA sobre el agua potable con respecto al bicarbonato. Sin embargo, las altas concentraciones de bicarbonato, junto con el calcio y el magnesio, hacen que el agua sea dura y pueden provocar la acumulación de incrustaciones. Custodio y Llamas (1996) indican que el bicarbonato en el agua dulce suele variar entre 50 y 350 mg/L. La Figura 7.10 muestra la variabilidad espacial de las concentraciones de bicarbonato en las aguas subterráneas y superficiales del TSCAS. Los valores de concentración de bicarbonato en las aguas subterráneas y superficiales oscilan entre 122 y 359 mg/L. El valor más alto se encontró en el pozo STC-10, en la parte sonorense del área de estudio del TSCAS.

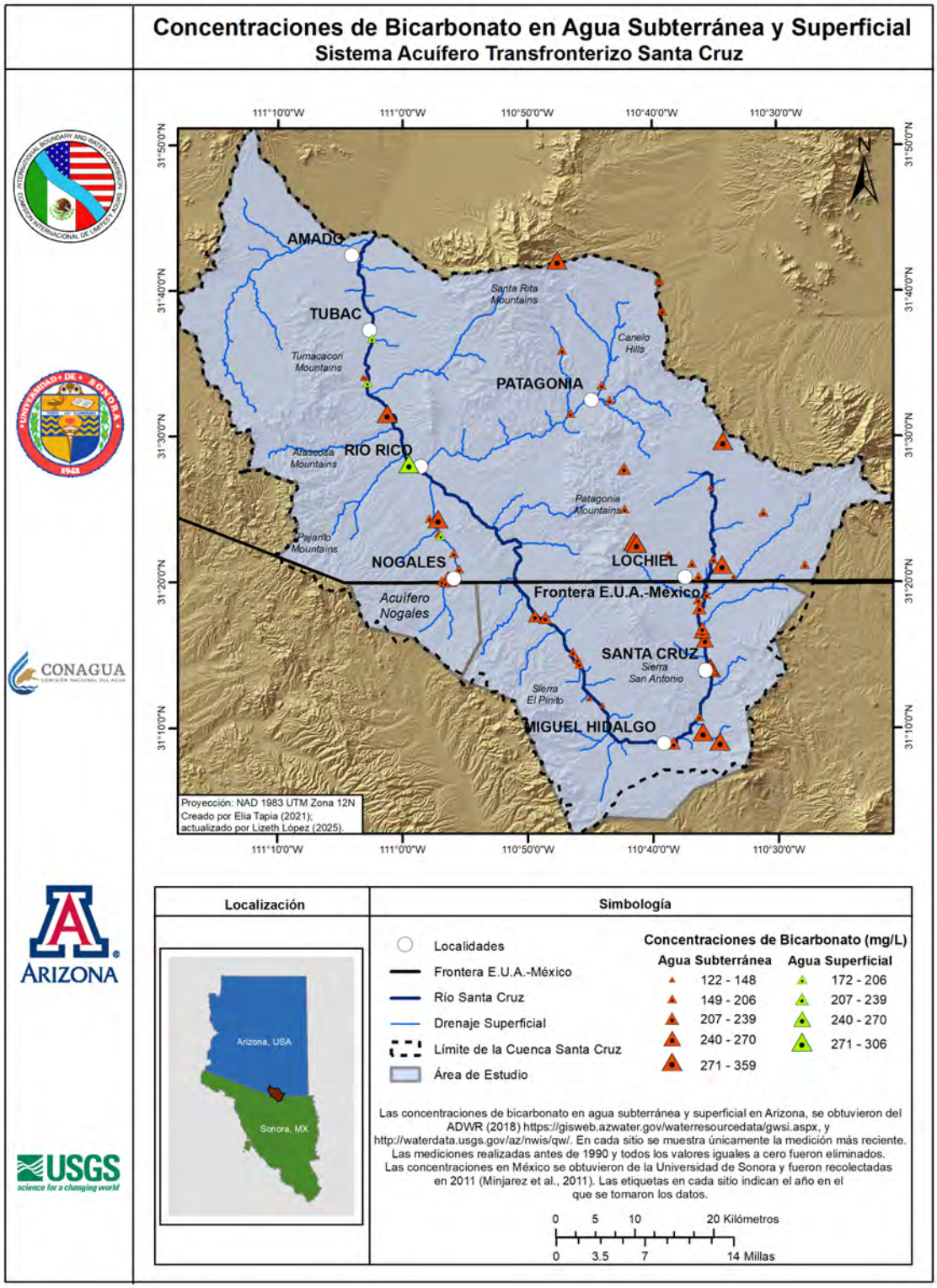


Figura 7.10 Variabilidad espacial de las concentraciones de Bicarbonato en agua subterránea y superficial del TSCAS

Potasio

El potasio (K) suele encontrarse en bajas concentraciones en las aguas subterráneas y puede provenir de la lixiviación de los suelos, de minerales aluminosilicatados como el feldespato potásico y las micas, de algunas evaporitas, de la descomposición de materia orgánica, de la intrusión de agua salada y de la contaminación antropogénica (Blake et al., 2008; Departamento de Energía (DOE), 1994). La Norma Oficial Mexicana no establece un límite máximo para el potasio. No obstante, Custodio y Llamas (1996) afirmaron que las concentraciones de potasio no deben ser superiores a 10 mg/L. La CONAGUA (2024) encontró concentraciones de potasio entre 1 y 5 mg/L. La Figura 7.11 muestra la variabilidad espacial de las concentraciones de potasio en las aguas subterráneas y superficiales de la TSCAS. Las concentraciones de potasio en las aguas subterráneas y superficiales oscilan entre 0.01 y 9.9 mg/L. Los valores más altos se encontraron en los pozos SCT-07 y Santa Cruz River, cerca de Rio Rico, Arizona.

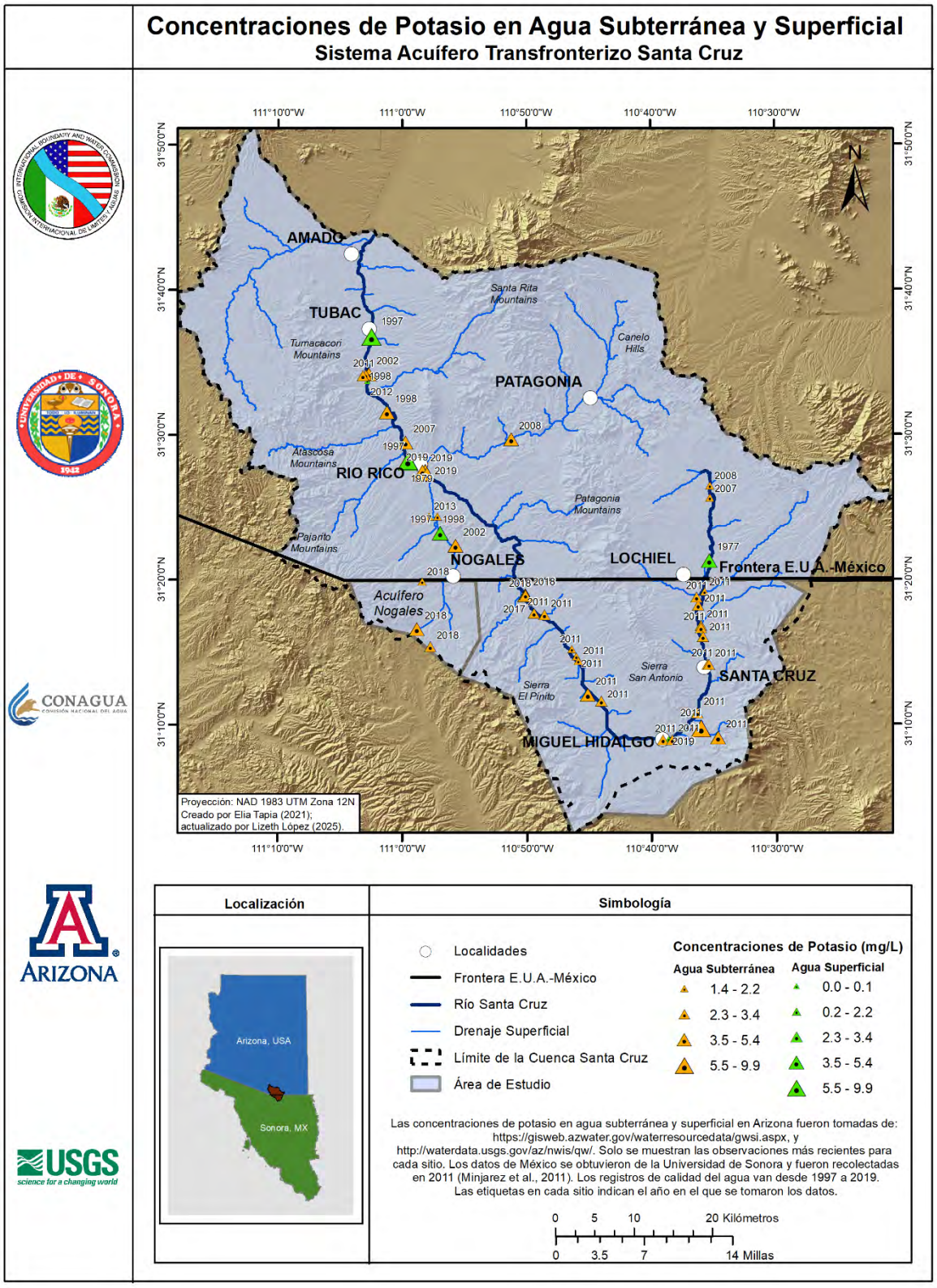


Figura 7.11 Variabilidad espacial de las concentraciones de Potasio en agua subterránea y superficial del TSCAS.

Cloruro

El cloruro (Cl-) es la forma más abundante del cloro en el agua expuesta a la atmósfera. Las principales fuentes naturales probables en el área de estudio son las rocas sedimentarias, incluidas las evaporitas y lutitas (Hem, 1985). Sin embargo, los yacimientos minerales o los depósitos hidrotermales son otras fuentes potenciales importantes de cloruro en la mayoría de las cuencas que contienen estos depósitos (Robertson, 1991). Por lo tanto, el cloruro está presente en varios minerales comunes que forman rocas, por ejemplo, micas, anfiboles y apatita, que pueden aportar iones de cloruro durante la meteorización (Mullaney et al., 2009). Los compuestos de cloruro son muy solubles, en particular la halita, y se sabe que estos compuestos se concentran en evaporitas o depósitos de playa que pueden formarse en áreas restringidas de la cuenca. Las fuentes antropogénicas son probablemente los residuos industriales, los efluentes tratados y no tratados y el cloro utilizado para la desinfección. Se transporta en gran medida de manera conservadora (sin sorción ni precipitación) en agua no salina (Hem, 1985).

La EPA (norma secundaria) ha establecido un límite máximo permisible de 250 mg/L para el uso y consumo humano de cloruro. En la parte sonorense del acuífero, las concentraciones de cloruro se encontraron por debajo del límite máximo permitido, variando entre 4 y 43 mg/L. La Figura 7.12 muestra la variabilidad espacial de las concentraciones de cloruro en las aguas subterráneas y superficiales del TSCAS. La concentración de cloruro en las aguas subterráneas y superficiales oscilan entre 0.01 y 200 mg/L, y el valor más alto se encontró en el pozo D-21-13 30DD1, en la parte de Arizona del área de estudio.

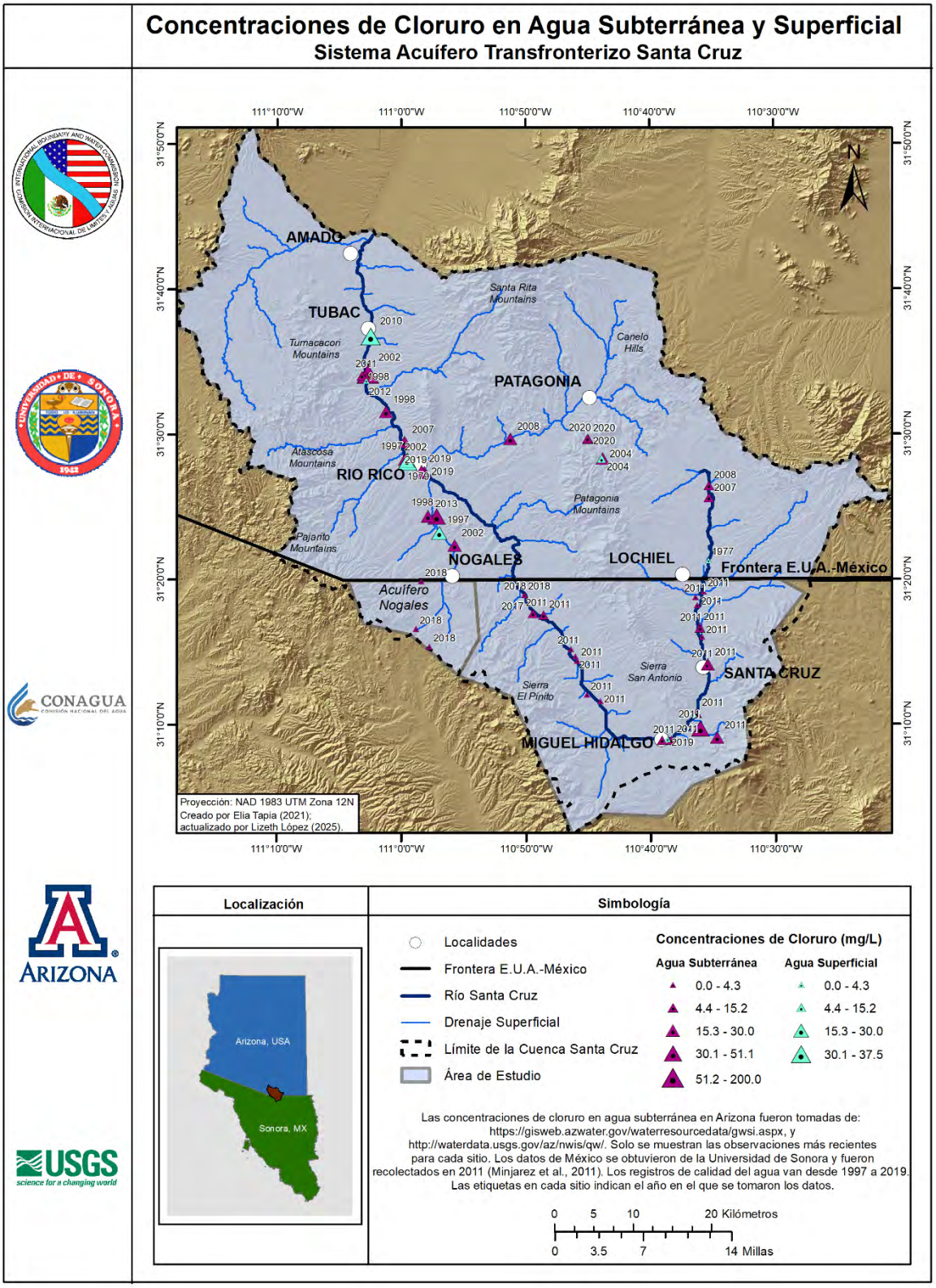


Figura 7.12 Variabilidad espacial de las concentraciones de cloruro en agua subterránea y superficial del TSCAS.

Sulfato

El sulfato (SO_4^{2-}) se encuentra en las aguas subterráneas y proviene tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Las principales fuentes naturales de sulfato incluyen la deposición atmosférica, la disolución de minerales de sulfato y la oxidación de minerales de sulfuro. En entornos volcánicos e hidrotermales de alta temperatura, el azufre se presenta en forma de sulfuros; cuando se exponen a la atmósfera o al agua oxigenada durante la meteorización, los sulfuros se oxidan y se convierten en sulfatos. La solubilidad moderada de los sulfatos permite que se produzcan concentraciones en evaporitas y depósitos de playa en forma de anhidrita y yeso (Robertson, 1991). Estos depósitos pueden ser la fuente de las grandes concentraciones de sulfato que se encuentran en la parte superior de la cuenca del Río Santa Cruz; sin embargo, los depósitos minerales son las fuentes más probables de sulfato en la mayoría de las cuencas. Las fuentes antropogénicas incluyen minas de carbón, centrales eléctricas, refinerías de fosfato y refinerías metalúrgicas (Miao et al., 2012).

La Figura 7.13 muestra la variabilidad espacial de las concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas y superficiales del TSCAS. En la parte de Arizona, las concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas y superficiales oscilan entre 0 y 260 mg/L. Las concentraciones de sulfato en el lado sonorense del acuífero Río Santa Cruz oscilaron entre 8 y 103 mg/L. Los valores más altos de sulfato (entre 1480 y 2580 mg/L) se encontraron en los pozos D-22-16 30ACB2 (Alum Gulch sobre Reef Mine), D-22-16 30BDA1 (Alum bajo Reef Mine), D-22-16 30ACB1 (Reef Mine Seep), D-22-16 32DCD y Alum Gulch en January Adit. Estas concentraciones de sulfato superan el estándar secundario de la EPA de 250 mg/L y el límite oficial mexicano de 400 mg/L.

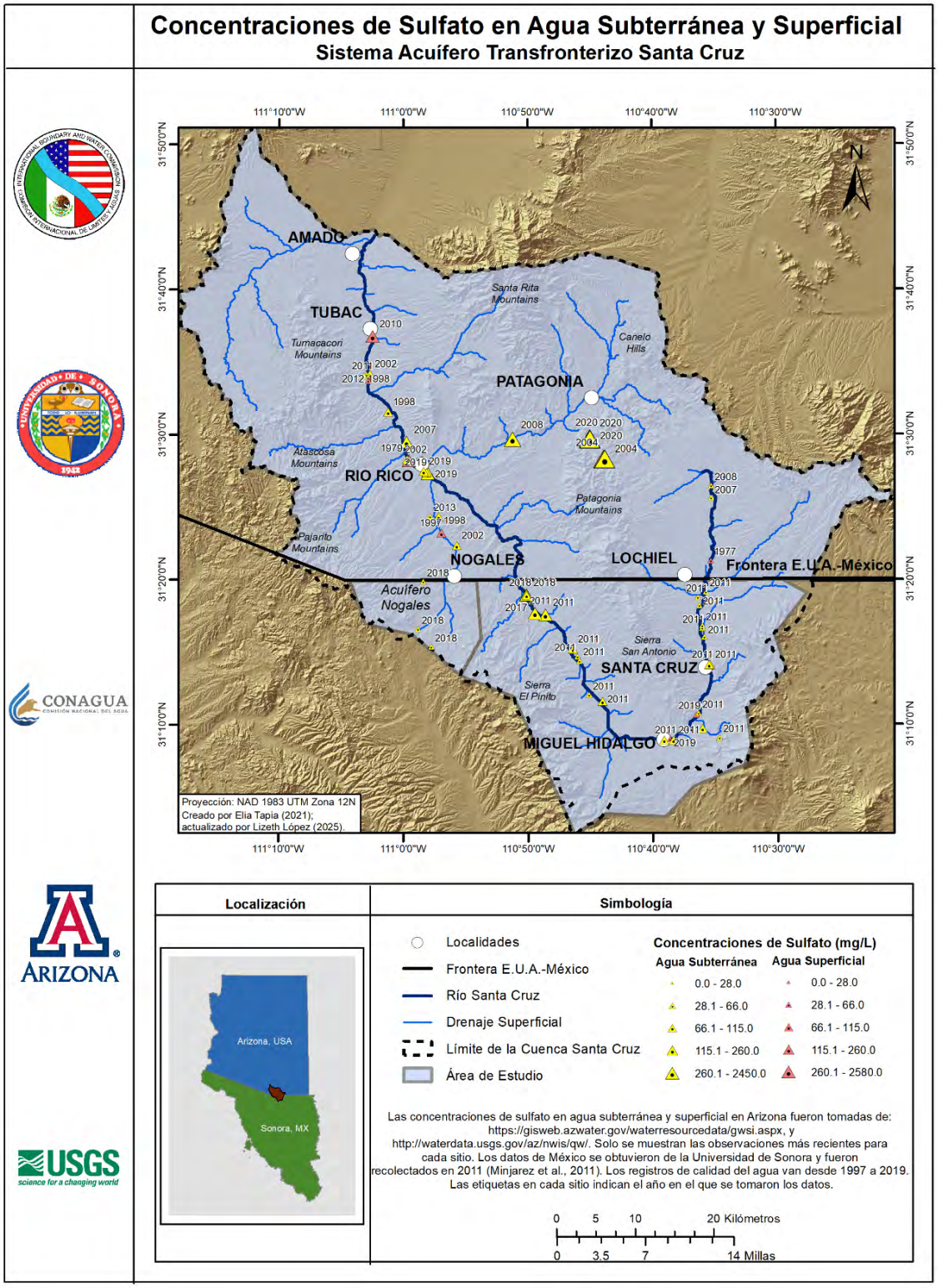


Figura 7.13 Variabilidad espacial de las concentraciones de sulfato en las aguas subterránea y superficial del TSCAS.

Diagramas de Stiff

El diagrama de Stiff es útil para una visualización y comparación del agua proveniente de diferentes fuentes. El patrón se construye a partir de tres o cuatro ejes horizontales paralelos entre sí, que se extienden a ambos lados de un eje vertical de cero (Fetter, 2001). Estos diagramas representan las concentraciones de los iones presentes en muestras seleccionadas a lo largo de dichos ejes. El primer eje representa la proporción de Mg y SO_4; el segundo grafica Ca y HCO_3 + CO_3; y el tercer eje combina Na y K en un lado del eje cero y Cl en el otro. El lado izquierdo de los polígonos resultantes representa los principales cationes: sodio (Na^+) más potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), mientras que el lado derecho representa los principales aniones: cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) más carbonato (CO_3^{2-}) y sulfato (SO_4^{2-}).

Los diagramas de Stiff se elaboraron a partir de los resultados de laboratorio de estudios que incluyen ADEQ (2003) y Minjarez et al. (2011). Estos diagramas muestran las concentraciones de los iones en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg) en las muestras seleccionadas.

Los diagramas indican que las concentraciones más altas de HCO_3 + CO_3 en agua subterránea se observaron en la región de Sonora, particularmente en el pozo STC-10, cerca de la localidad de Santa Cruz, México. Es importante señalar que estos valores elevados provienen de pozos ubicados predominantemente en las cercanías de arroyos y del río, lo que sugiere influencias localizadas. Las concentraciones más bajas se encontraron cerca de las Montañas Tumacácori. Asimismo, las concentraciones de cloruro representadas en los diagramas de Stiff se mantuvieron dentro de los límites máximos establecidos tanto por la NOM como por la EPA. A continuación, se presentan los diagramas de Stiff generados, cada uno etiquetado con el nombre de su sitio correspondiente (Figura 7.14-Figura 7.17). La Figura 7.18 muestra la ubicación de cada uno de los diagramas de Stiff dentro del área de estudio.

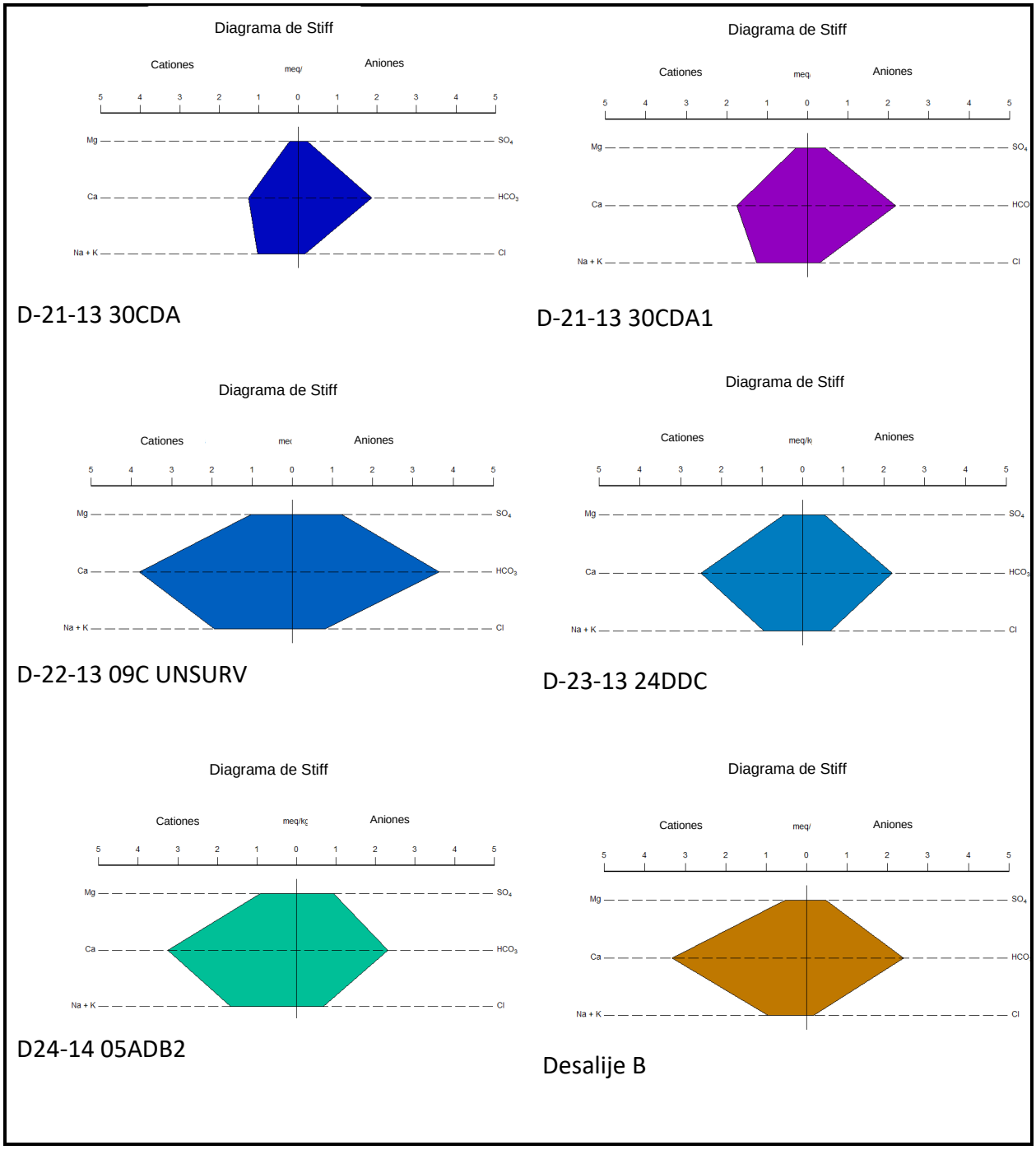


Figura 7.14 Diagramas de Stiff que muestran la composición iónica de las muestras de agua analizadas, expresada en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg).

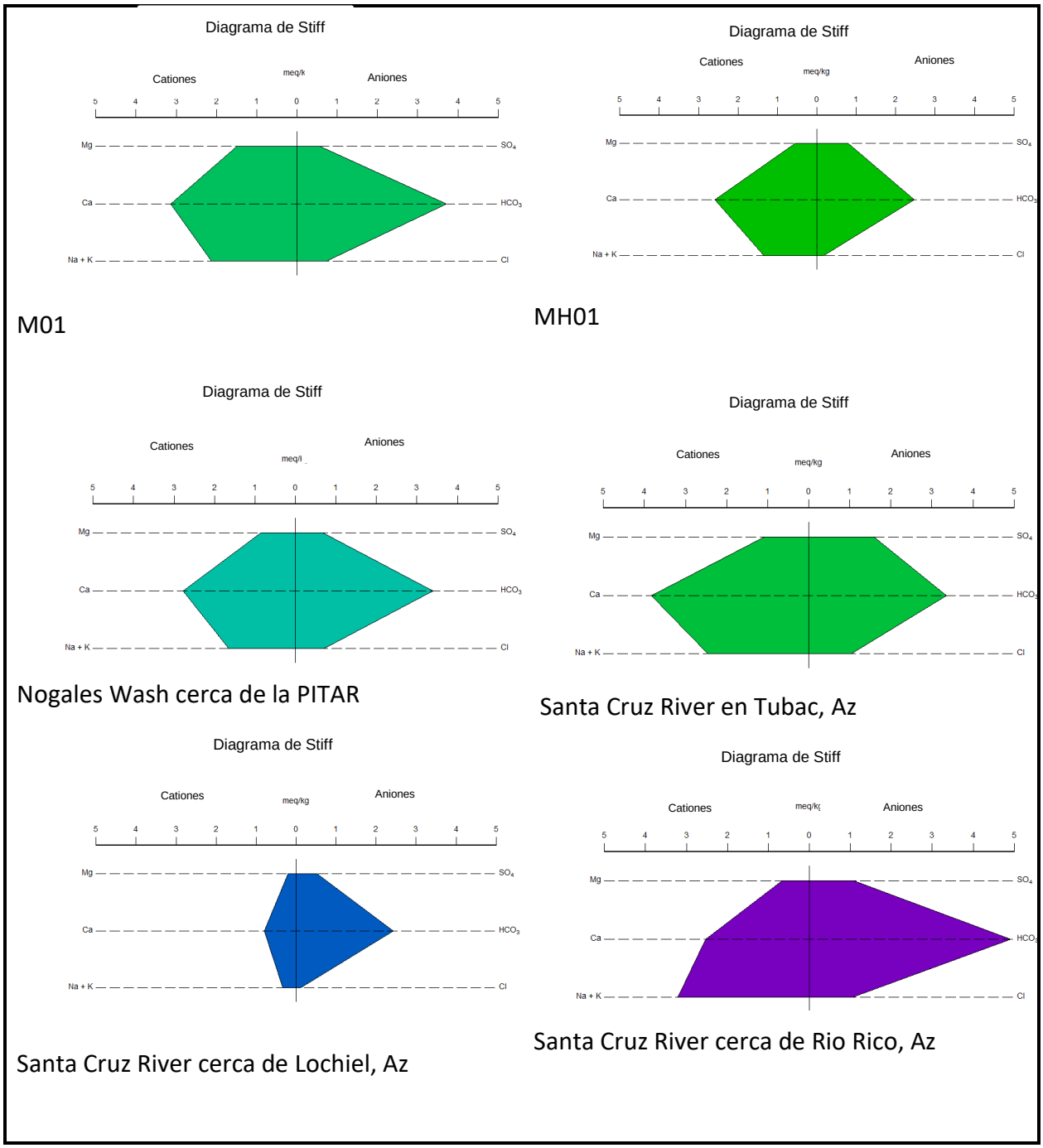


Figura 7.15 Diagramas de stiff que muestran la composición iónica de las muestras de agua analizadas, expresada en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg).

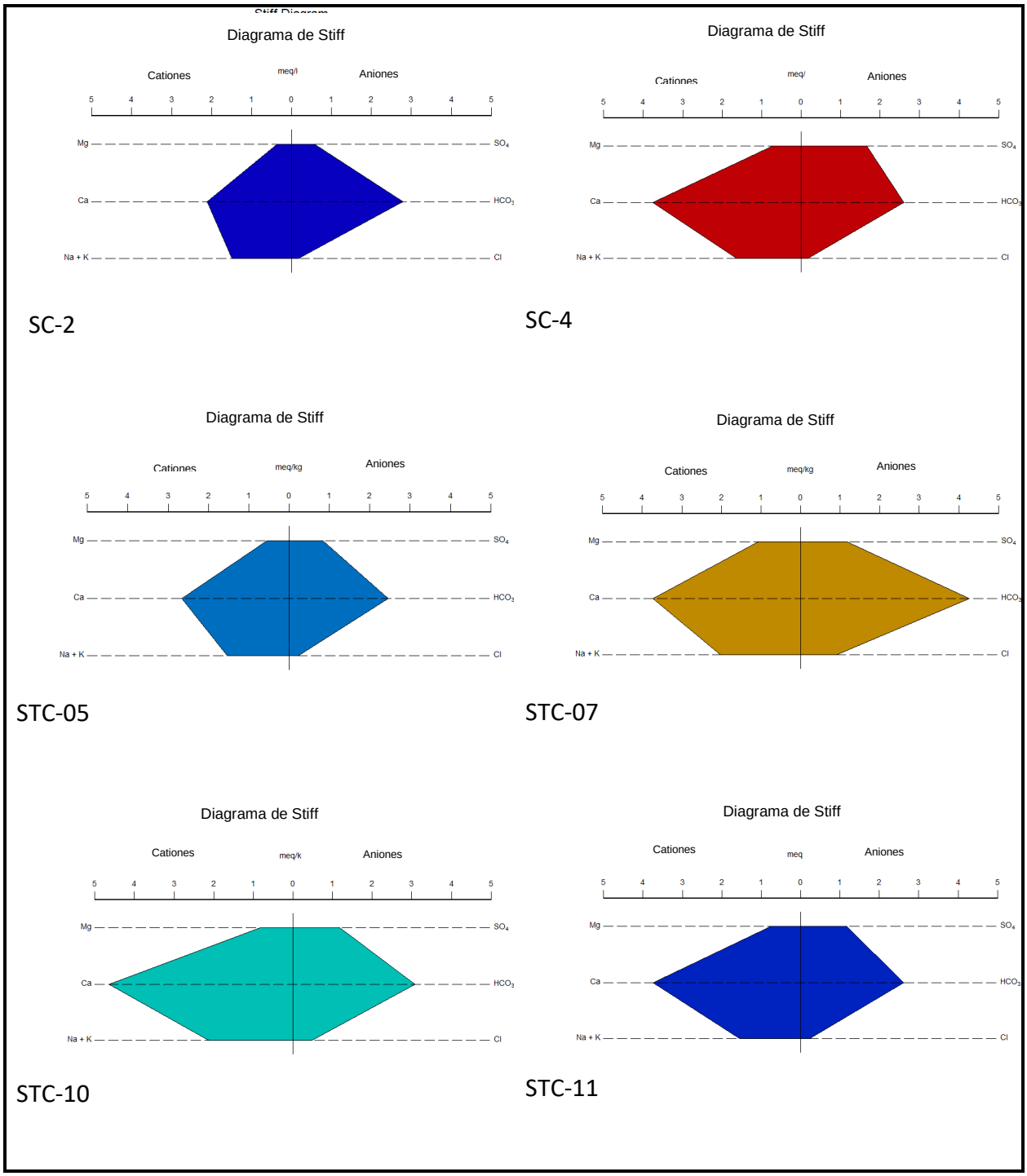
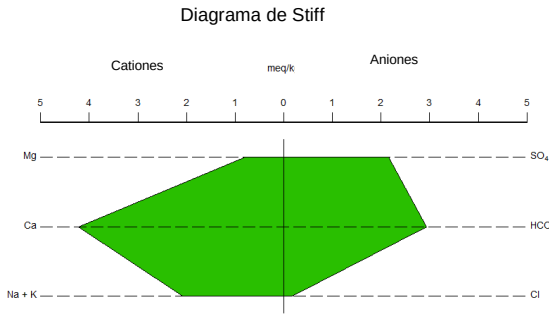
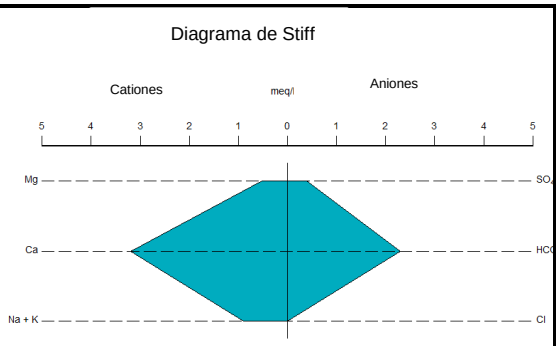


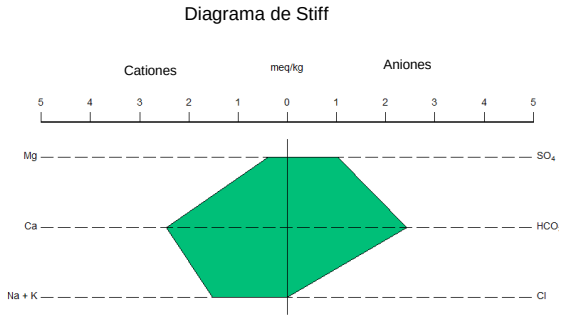
Figura 7.16 Diagramas de stiff que muestran la composición iónica de las muestras de agua analizadas, expresada en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg).



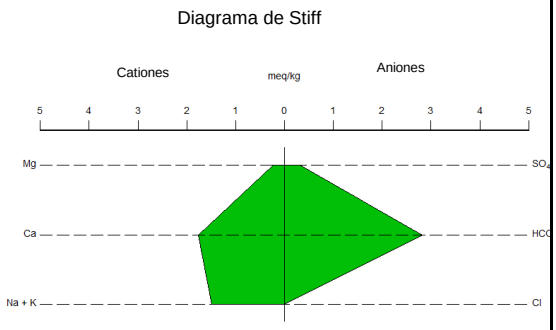
STC-50



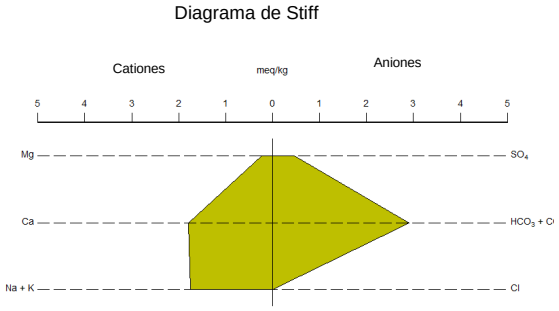
Desalije c



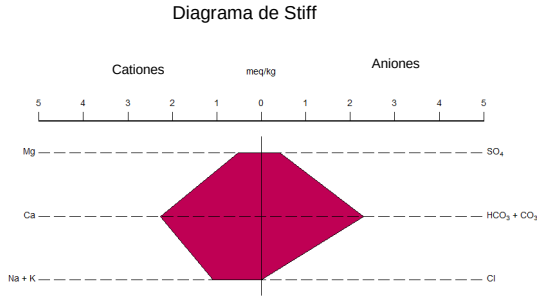
STC-52



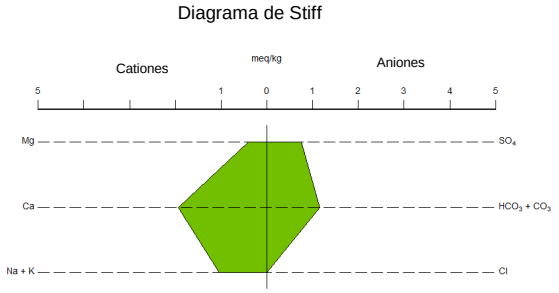
STC-53



STC-51



STC-19



STC-26

Figura 7.17 Diagramas de stiff que muestran la composición iónica de las muestras de agua analizadas, expresada en miliequivalentes por kilogramo (meq/kg).

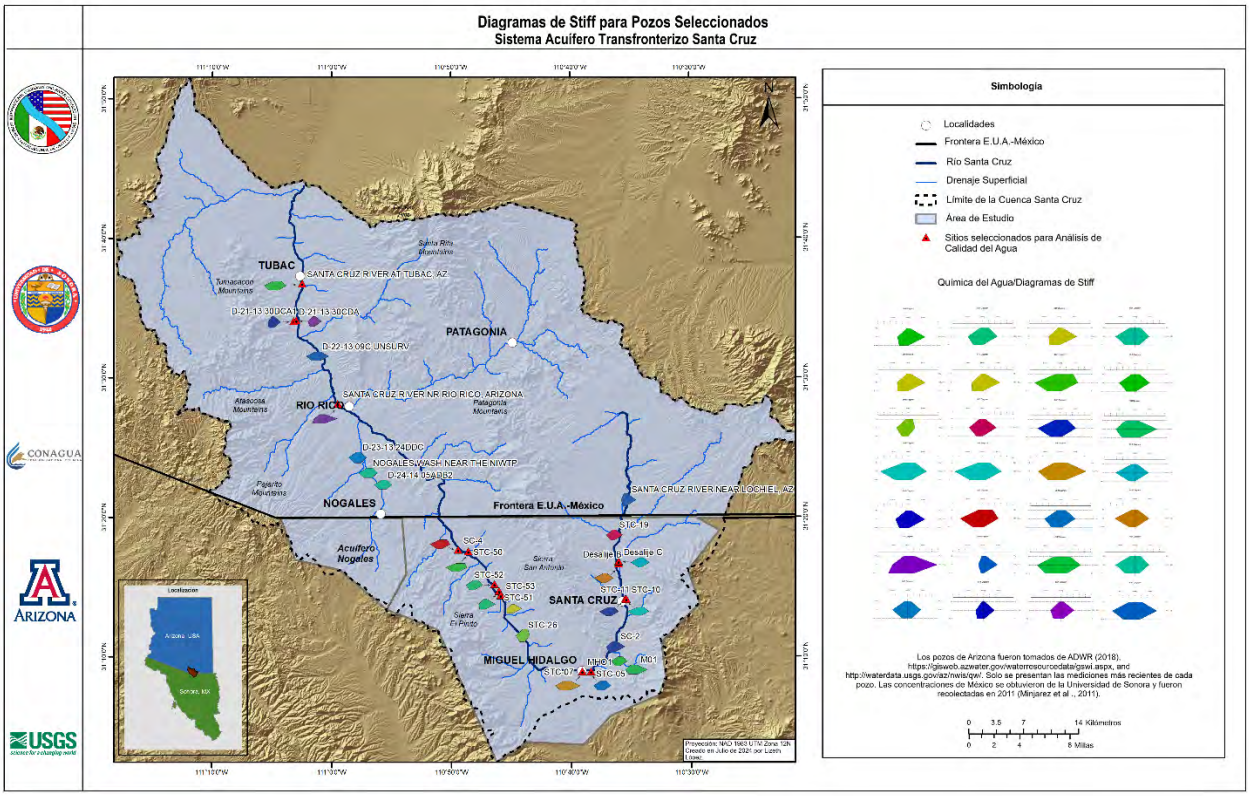


Figura 7.18 Diagramas de stiff para pozos seleccionados, que muestran la ubicación en el mapa de los sitios de muestreo.

Los diagramas de Stiff indican que el tipo de agua predominante en los sitios analizados es bicarbonatada cálcica (Ca-HCO_3), con variaciones locales hacia facies mixtas de bicarbonato y, en menor medida, composiciones que muestran una mayor influencia de sodio y cloruro. Este patrón se observa tanto en los pozos de agua subterránea como en sitios de agua superficial asociados con el Río Santa Cruz y sus tributarios. La similitud en la composición de los iones principales entre algunos pozos y sitios de agua superficial sugiere procesos de mezcla y recarga local, particularmente en áreas cercanas al arroyo Nogales y la PITAR, así como, en zonas influenciadas por el drenaje de áreas mineras históricas, lo que puede modificar localmente la composición y la calidad del agua.

En cuanto a las concentraciones de iones principales, los diagramas muestran que los valores más altos se asocian principalmente con el bicarbonato (HCO_3^-) y el calcio (Ca^{2+}), con aumentos localizados de sodio (Na^+), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}). Es probable que estas variaciones estén relacionadas con las condiciones hidrogeológicas y antropogénicas específicas del lugar, incluida la

interacción entre el agua y las rocas, las entradas de efluentes tratados y la meteorización de las rocas mineralizadas.

7.6.6. Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales de la CILA

La calidad del agua del Río Santa Cruz, cerca de la frontera internacional, está influenciada por la escorrentía urbana y otros flujos procedentes de dos ciudades: Nogales, Arizona, y Nogales, Sonora. Estas ciudades están divididas únicamente por la frontera internacional y se denominan colectivamente "Ambos Nogales". En la década de 1940, cuando la población de la zona comenzó a aumentar, se hizo necesario mejorar la recolección y el tratamiento de las aguas residuales. Basándose en la autoridad establecida en el tratado de 1944 entre Estados Unidos y México (Utilización de las aguas... 1944), la Comisión Internacional de Límites y Aguas, en nombre de ambos gobiernos y en colaboración con Ambos Nogales, llegó a un acuerdo para construir una planta de tratamiento internacional conjunta y binacional en 1945. La planta, diseñada para tratar las aguas residuales de ambas comunidades, se terminó de construir en 1951 en el lado estadounidense de la frontera. En 1972, se construyó una nueva planta, la PITAR, para satisfacer las crecientes necesidades de la población, y se trasladó desde la frontera a su ubicación actual, aproximadamente a 9 millas al norte, en Río Rico, Arizona. La PITAR trata aproximadamente 15 millones de galones por día (mgd) (CILA, 2009), con una composición de caudales de aproximadamente un 80% procedente de México y un 20% de los Estados Unidos. La sección estadounidense de la CILA se hizo cargo del funcionamiento de la planta para la ciudad de Nogales, Arizona, en 1998.

La PITAR es una importante fuente de agua para el Río Santa Cruz. Las aguas residuales de la instalación son una de las principales fuentes de retorno de flujo superficial a este tramo del río. La instalación y los procesos de la planta de tratamiento se modernizaron en 1992 y 2009 para mejorar la calidad del agua mediante la mejora del proceso de eliminación biológica de nutrientes y desinfección. Esto se hizo porque las concentraciones de las aguas residuales en algunos parámetros estaban afectando a la calidad del agua del río. Los efluentes no cumplían los niveles de calidad del agua exigidos para el cadmio, la *Escherichia coli* (*E. coli*), el cloro total y el nitrógeno amoniacal. Estos parámetros excedieron los niveles que llevaron a la clasificación de este tramo como «deteriorado» en términos de calidad del agua. A partir de 2018, debido a las mejoras realizadas en el PITAR en el proceso de tratamiento, la ADEQ propuso eliminar el cadmio, el cloro total y el amoníaco de la lista de preocupaciones por deterioro, dejando la bacteria indicadora, *E. coli*, como el único deterioro dentro de este tramo. En los últimos cinco años, los niveles de *E. coli* se han reducido y solo se han producido casos mínimos que superan el estándar de 126 ufc/100 ml (ADEQ, 2019).

Ambas secciones de la CILA también supervisan de forma rutinaria otros caudales que desembocan en el Río Santa Cruz, como el arroyo Nogales. Estas labores de supervisión incluyen la colaboración en materia de caudales superficiales, como los desbordamientos de aguas residuales sanitarias, la

adopción de las medidas necesarias para la pronta notificación y acción, como la desinfección con cloro, y avances para mitigar el problema. La información sobre estos eventos y los programas de monitoreo se comparten con las partes interesadas de Ambos Nogales, que se reúnen cada trimestre en una reunión técnica binacional para compartir información y discutir los problemas actuales y las soluciones.

La Sección estadounidense de la CILA también opera bajo un Permiso de Protección de Acuíferos (APP) para supervisar el nivel y la calidad del agua subterránea cerca de la PITAR y el Río Santa Cruz. En virtud del APP, se establecen niveles de alerta y protección para garantizar que cualquier migración de los flujos superficiales o la infiltración no cause problemas de calidad de agua en el acuífero Río Santa Cruz. Se recopilan datos de forma rutinaria sobre las bacterias y calidad general del agua, como la temperatura, el pH, los compuestos inorgánicos y orgánicos, los metales pesados y los pesticidas. Los datos de 2012 a 2020 muestran que los parámetros están por debajo de los niveles de alerta y protección, y muchos de ellos están por debajo de los límites de detección (los datos de la CILA se comunican al ADEQ y pueden obtenerse en el Portal de Calidad del Agua de la EPA). La mejora realizada en 2009 en la PITAR está contribuyendo a sostener los suministros de agua superficial y subterránea en la zona transfronteriza de Ambos Nogales.

7.6.7. Compuestos Orgánicos

Bajo los auspicios de un acuerdo de la CILA entre los Estados Unidos y México firmado en 1996, se llevó a cabo un estudio interinstitucional sobre la calidad de agua subterránea y del suelo en 1997-1998 a lo largo del arroyo Nogales (CONAGUA, 2015). El estudio identificó la presencia de percloroetileno, nitrato y bacterias coliformes fecales en Nogales, Sonora, con niveles de compuestos orgánicos volátiles detectados por encima de los límites reglamentarios mexicanos. Se detectaron percloroetileno, nitrato y arsénico en Nogales, Arizona. Un estudio realizado en 1999 por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos (USFWS) (King et al., 1999) analizó el agua, los sedimentos, los macroinvertebrados, los peces y las aves a lo largo de la parte alta del Río Santa Cruz. La mayoría de las muestras se analizaron para detectar metales traza y organoclorados (pesticidas) y bifenilos policlorados (PCB). Los resultados indicaron que las concentraciones de metales traza eran bajas y no suponían un riesgo significativo para los organismos. El mismo estudio (King et al., 1999) también reveló que los compuestos organoclorados no representaban una amenaza para la supervivencia y la reproducción de los peces. Sin embargo, identificaron que el amoníaco no ionizado era el principal agente tóxico responsable de la mortalidad de los peces.

Como se mencionó anteriormente, la PITAR se modernizó en 2009 CILA, 2020) y se redujeron las concentraciones de amoníaco. Paretti et al. (2010), en parte para comparar con el estudio de King et al. (1999), tomaron muestras del Río Santa Cruz y del acuífero asociado para analizar una variedad de compuestos orgánicos y metales. El objetivo era determinar qué factores químicos adicionales podrían estar afectando a la recuperación del ecosistema acuático tras la reducción del nitrato. Su enfoque

consistió en utilizar muestreos estacionales y pasivos para identificar y cuantificar los contaminantes orgánicos e inorgánicos en el agua, los sedimentos, las plantas, los macroinvertebrados acuáticos y los peces en cinco lugares de la cuenca hidrográfica. También se realizaron muestreos estacionales para comprender la variabilidad temporal de los contaminantes en el ecosistema acuático. Se desplegaron dos tipos de muestreadores pasivos durante un mes para obtener compuestos orgánicos integrados en el tiempo. Las clases de compuestos que se analizaron incluyen compuestos orgánicos halogenados (pesticidas, PCB y retardantes de llama), productos farmacéuticos, compuestos de aguas residuales (plastificantes, metabolitos de detergentes, fragancias, hidrocarburos aromáticos policíclicos, esteroles) y hormonas. Los resultados mostraron compuestos de muchas clases en las aguas superficiales aguas abajo de la PITAR y en el Parque Histórico Nacional Tumacácori, con bioacumulación de pesticidas, retardantes de llama y triclosán en peces y macroinvertebrados (Paretti et al., 2010).

7.6.8. Microbios

Varios estudios han abordado el tema de los microbios. Entre ellos se incluyen los estudios de McOmber (2014), Paretti et al. (2019), Norman et al. (2012) y el estudio mencionado anteriormente en la sección 7.6.7 publicado por la CILA en 2001. Norman et al. (2012) realizaron un estudio sobre el suministro de agua doméstico en dos colonias de Nogales, Sonora. El agua analizada proviene de fuentes subterráneas, pero se transporta en camiones o mediante el sistema municipal de abastecimiento de agua. Encontraron niveles de *E. coli* superiores al estándar de agua potable de la EPA en la Colonia Colosio, y se detectaron bacterias coliformes totales en más del 50% de los hogares de ambas colonias (Norman et al., 2012). Los niveles de ambos eran significativamente más altos en verano que en invierno. Paretti et al. (2019), realizaron un estudio sobre *la E. coli* y los marcadores de fuentes microbianas para comprender las fuentes y el momento de aparición en el Río Santa Cruz y sus afluentes entre la frontera entre Estados Unidos y México y Tubac, Arizona. Los niveles *de E. coli* fueron altamente variables en el espacio y el tiempo, con variaciones significativas durante las inundaciones e incluso en una escala de 24 horas, con algunas concentraciones que superaban los estándares de calidad del agua. El tiempo medio de desplazamiento de las inundaciones era de unas 8 horas entre la estación del arroyo Nogales y la estación del Río Santa Cruz en Tubac. Las concentraciones más altas de *E. coli* en este estudio (Paretti, 2019) se encontraron en el arroyo Nogales. McOmber (2014) analizó la presencia de *E. coli* a lo largo de un tramo del Río Santa Cruz al norte de Nogales y también encontró las concentraciones más altas de *E. coli* en la estación del arroyo Nogales, y la concentración más baja en la desembocadura de la PITAR.

7.7. Modelo Conceptual Geoquímico e Hidrológico utilizando Isótopos

Las mediciones de isótopos estables de oxígeno (O) e hidrógeno (H) en el agua proporcionan información sobre el origen y la evolución de las aguas subterráneas. En el suroeste árido y semiárido de Estados Unidos, los datos de isótopos estables son

útiles para determinar la altitud a la que ocurrió la precipitación y la cantidad de evaporación antes de la infiltración (Eastoe y Wright, 2019; Eastoe y Towne, 2018). Los isótopos de azufre (S y O) del sulfato (SO_4^{2-}), utilizados junto con la concentración de sulfato, proporcionan un indicador de la contribución de las aguas subterráneas al caudal base (Gu et al., 2008). Son especialmente útiles en zonas en las que se comparan fuentes rocosas con características isotópicas de S contrastadas. Los datos de isótopos estables se miden como proporciones (ratios), en estos casos $^{2}H/^{1}H$ (o D/H), $^{18}O/^{16}O$ y $^{34}S/^{32}S$ (Clark y Fritz, 1997). Los resultados se expresan utilizando la notación δ: $\delta^2H = ((R_{muestra}/R_{estándar}) - 1) \times 1000$ ‰, donde $R = {}^{2}H/^{1}H$ y el estándar es el Agua Oceánica Media Estándar de Viena (VSMOW, por sus siglas en inglés). La definición de $\delta^{18}O$ es análoga, con $R = {}^{18}O/^{16}O$, y el estándar es VSMOW. Para $\delta^{34}S$, $R = {}^{34}S/^{32}S$ y el estándar es la Troilita del Cañón del Diablo de Viena (VCDT) (Krouse y Coplen, 1997).

El tritio, con una vida media de 12.32 años (Lucas y Unterweger, 2000), se genera continuamente en la atmósfera superior como resultado de reacciones nucleares causadas por los rayos cósmicos. En Tucson, Arizona, el nivel medio de tritio cosmogénico en el agua de lluvia es de 5.4 TU (unidades de tritio; 1 TU = 1 átomo de tritio por cada 10^{18}átomos de hidrógeno) (Eastoe et al., 2011). Entre 1953 y 1975 se añadió un pulso de tritio a la atmósfera como resultado de los ensayos atmosféricos de armas nucleares. El tritio liberado a la atmósfera durante los ensayos de armas nucleares entre 1953 y 1975 puede detectarse en las aguas subterráneas que se han recargado por precipitación desde aproximadamente 1955. Si los niveles de tritio en el agua están por debajo del límite de detección de 0.6-0.7 TU, entonces se considera que el agua es más antigua que la recarga posterior a 1953 que contiene tritio por encima del límite de detección.

El carbono 14 (^{14}C), con una vida media de 5730 años, puede proporcionar información comparativa útil sobre los tiempos de residencia del agua subterránea para la recarga que se produjo hace cientos o miles de años. Se puede medir en especies de carbono inorgánico disuelto (normalmente bicarbonato) en el agua subterránea. La determinación precisa de los tiempos de residencia es difícil debido a la compleja evolución de las especies de carbono inorgánico disuelto en el agua subterránea. Al igual que el tritio, el ^{14}C se genera en la atmósfera superior y en explosiones nucleares en la atmósfera. Se han combinado datos isotópicos de múltiples fuentes y se muestran en las Figura 7.19, Figura 7.20 y Figura 7.21. El siguiente análisis se centra en la interpretación del conjunto de datos combinados, más que en las conclusiones de los estudios individuales.

7.7.1. Isótopos Estables en el Agua

Precipitación

Se dispone de pocas mediciones de isótopos estables del agua en la zona de estudio inmediata. Las medias ponderadas por cantidad estacional de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ se han estimado a partir de conjuntos de datos a largo plazo de la cuenca de Tucson (Eastoe y Dettman, 2016; Eastoe y Wright, 2019), ajustadas a

una altitud de 1600 m sobre el nivel medio del mar (snmm) utilizando las tasas de lapso de Eastoe y Wright (2019). Aquí se considera que el invierno abarca los meses de noviembre a mayo, y el verano, los meses de junio a octubre. Los datos se presentan en dos formas: (1) medias basadas en los datos de todos los eventos de precipitación, y (2) medias basadas en los datos del 30% de los meses más húmedos. La segunda forma surge de la observación de que los datos δ^{18} O y δ^{2} H suelen situarse cerca de una línea de agua meteórica local modificada (LMWL) definida por las medias del 30% de los meses más lluviosos, pero no en la LMWL definida por las medias de todos los datos. Las mediciones de δ^{18} O y δ^{2} H en las aguas subterráneas de las cuencas aluviales del sur de Arizona, una cuenca aluvial del norte de Sonora y las partes de menor altitud de los bloques montañosos de la misma región se representan en la LMWL modificada (Eastoe y Towne, 2018; Eastoe y Wright, 2019). Esta observación implica que la recarga se produce principalmente durante los meses más húmedos.

Aguas Superficiales

Existe un amplio conjunto de mediciones de δ18O y δ2H para el Río Santa Cruz, cerca de Tubac, Arizona (Treese et al., 2009; Callegary et al., 2018). El agua del Río Santa Cruz proviene de varias fuentes: descargas de la PITAR (incluyendo el agua subterránea bombeada del acuífero Río Santa Cruz y los campos de pozos de Los Alisos para el suministro municipal en Nogales, Sonora, y el agua bombeada de los acuíferos de la «microcuenca» y el campo de pozos Potrero para el suministro municipal en Nogales, Arizona), además de escorrentía natural y almacenamiento ribereño. Para el gráfico de la Figura 7.19, los datos isotópicos del agua superficial del Río Santa Cruz se han separado en temporadas de monzón (julio a septiembre) y de caudal base (octubre a junio, indicadas con BF). Los datos de ambas temporadas se representan en gráficos con una pendiente cercana a 4, considerada la pendiente de las tendencias de evaporación en el sur de Arizona (Gungle et al., 2016; Eastoe y Towne, 2018).

Las tendencias lineales pasan por la media ponderada a largo plazo de todas las precipitaciones invernales y podrían interpretarse como la evaporación del almacenamiento invernal en los bancos; sin embargo, la precipitación media estival se sitúa cerca de la tendencia, lo que permite la posibilidad de contribuciones estivales además de las contribuciones invernales al caudal. Las tendencias lineales también pasan por el grupo principal de datos sobre las aguas subterráneas de las Montañas Patagonia. La dispersión de los datos, que es mayor durante las inundaciones monzónicas que en el caudal base, sugiere una influencia transitoria de los eventos de precipitación individuales. Se cree que estos varían mucho en δ^{18}O y δ^{2}H en el área de estudio, como se observó en Tucson (Eastoe y Dettman, 2018).

Un conjunto de datos más pequeño para el arroyo Nogales, al sur de Tubac, en Arizona (Treese et al., 2009; Callegary et al., 2018) se sitúa cerca de las tendencias de evaporación definidas por las aguas superficiales del Río Santa Cruz. Un único punto de datos en el arroyo Sonoita, aguas abajo del lago Patagonia, también se sitúa cerca de las tendencias y presenta una mayor evaporación que cualquier otra agua superficial del conjunto de datos. Aguas arriba

del lago Patagonia, los datos del caudal base y de la etapa de inundación monzónica del arroyo Sonoita (Montgomery et al., 2009; et al., 2008) se sitúan en una única tendencia de pendiente 6, demasiado pronunciada para ser una tendencia de evaporación, y más probable que se explique por la mezcla. Los extremos se discuten a continuación. La falta de valores más altos de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ en el agua superficial del monzón probablemente se debió al muestreo limitado, que se llevó a cabo solo durante cuatro días. Se ha omitido una pequeña cantidad de datos sobre el agua superficial de las Montañas Patagonia (Wanty et al., 2001; Gu et al., 2008) en la Figura 7.19 para mejorar la claridad de la misma.

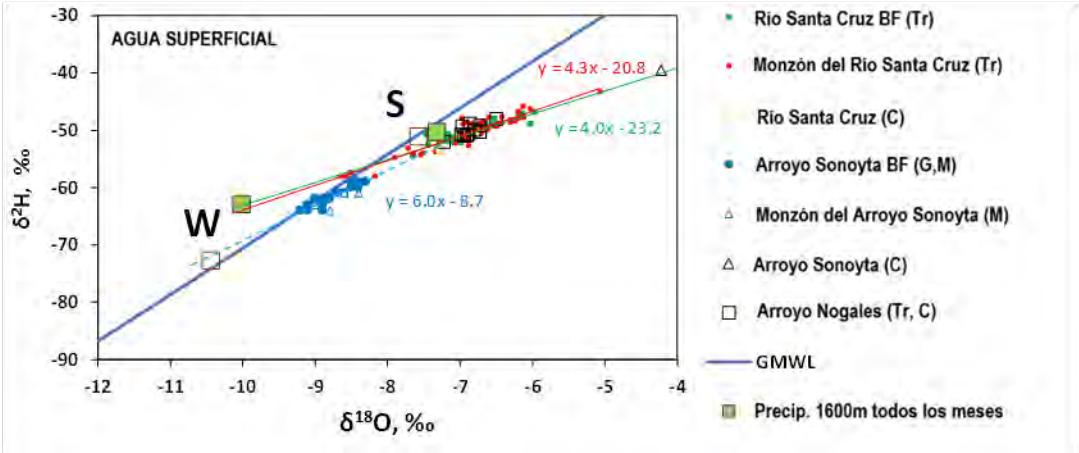


Figura 7.19 Gráfico de δ^{2} H frente a δ^{18} O para las aguas superficiales de la cuenca alta del Río Santa Cruz.

También se muestran las medias ponderadas por cantidad para las precipitaciones estacionales (S = verano; W = invierno), calculadas para todos los datos y para el 30 % de los meses más lluviosos (véase Eastoe y Towne, 2018) y la línea global de agua meteorológica (GMWL) (Craig, 1961). Las fuentes de datos se muestran en la leyenda, entre paréntesis: Callegary et al., (2018) (C); Gu et al., (2008) (G); Montgomery et al., (2009) (M); Treese et al., (2009) (Tr).

Agua Subterránea en las Montañas

Los datos de las zonas altas, a unos 1,600 m sobre el nivel del mar, en las Montañas Patagonia, pueden considerarse representativos de las aguas subterráneas de montaña en toda la zona de estudio. Existen tres conjuntos de datos de isótopos estables de aguas subterráneas (Wanty et al., 2001; Gu, 2005; Schrag-Toso, 2020), además de una única medición del pozo Alum Gulch de Montgomery et al. (2009). Las aguas subterráneas de montaña se muestran como rombos amarillos en la Figura 7.20. La mayoría de estos datos se representan como un grupo cerca de ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) = (-8,6 +/- 0,5, -56 +/- 4‰), con equivalentes evaporados representados a la derecha del grupo. Un pequeño conjunto de valores atípicos (cuatro puntos) se representa por debajo del grupo principal (Figura 7.20).

Las muestras menos evaporadas del grupo principal incluyen agua subterránea recargada a partir de todas las precipitaciones en algunos casos (representadas cerca de la LMWL para todos los datos) y recargada a partir de las precipitaciones solo durante los meses más húmedos en otros casos (representadas cerca de la LMWL modificada para el 30% de los meses más húmedos). Las precipitaciones de verano e invierno contribuyen aproximadamente por igual a la recarga. La mayoría de las muestras del grupo principal contienen tritio finito (Gu, 2005; Schrag-Toso, 2020), lo que indica que se trata de un sistema de aguas subterráneas joven, ya que gran parte del agua se ha infiltrado desde 1953. Hay presencia de agua más antigua, como lo indican los contenidos de ^{14}C de 34.0 y 56.8 pMC en dos muestras con tritio indetectable (Schrag-Toso, 2020).

Los valores atípicos incluyen una muestra (pozo Alum Gulch) con la misma composición isotópica (-10.5, -73‰) que la media del 30% más húmedo de los meses de invierno. Schrag-Toso (2020) obtuvo un contenido de ^{14}C de 9.5 pMC para una muestra de este pozo, con (δ^{18} O, δ^{2} H) = (-10.2, -73‰). Otros valores atípicos incluyen muestras cercanas (-9.2, -72‰), presentes en los tres conjuntos de datos, y una muestra altamente evaporada (-4.5, -58‰) de agua que se filtra de los residuos de la Mina Europea. La muestra atípica del conjunto de datos de Gu (2005) no contiene tritio detectable. Los valores atípicos se agrupan con los datos isotópicos de agua subterránea antigua del sureste de Arizona (Figura 7.21). Se identificó que el agua subterránea antigua tenía un pMC < 10 (Eastoe, 2023; utilizando datos de Smalley, 1983; Eastoe et al., 2004; Earman, 2004; Eastoe, 2007; Hopkins et al., 2013; Eastoe y Towne, 2018; Tucci, 2018) de una época en la que los valores de $\delta^{18}O$ eran entre 2 y 3‰ inferiores a los de la precipitación media actual. El aumento de los valores de $\delta^{18}O$ en las precipitaciones se ha datado entre 13,000 y 15,000 años basándose en la datación por edad de un espeleotema recogido en las Montañas Santa Rita, inmediatamente al norte de la zona de estudio (Wagner et al., 2010). Por lo tanto, las muestras atípicas de las Montañas Patagonia representan la recarga de una época anterior a hace 13,000 años.

Por lo tanto, las Montañas Patagonia contienen dos sistemas de aguas subterráneas distintos: uno que contiene principalmente agua subterránea residente desde hace varias décadas y otro con agua subterránea de más de 13,000 años de antigüedad. Aguas subterráneas similares de edades contrastantes se encuentran a una altitud similar en el norte de las Montañas Santa Rita (Eastoe y Wright, 2019, utilizando datos de Montgomery et al., 2009), donde los isótopos estables muestran evidencia de mezcla entre ambos tipos de agua.

Agua subterránea de la cuenca

Las aguas subterráneas de las cuencas aluviales que rodean las Montañas Patagonia (valle de San Rafael, acuífero Río Santa Cruz en Sonora y a lo largo del arroyo Sonoita en el pueblo de Patagonia) se sitúan en un campo cuadrilátero por encima de las tendencias de evaporación idénticas de las Montañas Patagonia y el agua del Río Santa Cruz, y a la izquierda por la LMWL modificada para el 30% de los meses más húmedos. El límite inferior puede incluir aguas subterráneas antiguas, además de la

recarga invernal actual. Por lo tanto, las aguas subterráneas de la cuenca incluyen una variedad de mezclas entre el agua superficial evaporada, por un lado, y combinaciones no evaporadas de precipitaciones de verano e invierno, por otro. Las combinaciones de precipitación estival e invernal probablemente correspondan a agua subterránea de origen montañoso, como en el caso del Valle de San Rafael, donde la distribución de los datos se extiende desde el agua subterránea de las Montañas Patagonia hacia las tendencias de evaporación del agua superficial. En el Valle de San Rafael, las aguas subterráneas con los valores más altos de δ^{18} O y δ^{2} H, es decir, las que más se asemejan al agua superficial evaporada, se encuentran en el centro de la cuenca (Towne, 2003). El mismo régimen de mezcla explica la tendencia lineal del caudal base en el arroyo Sonoita, aguas arriba del lago Patagonia (Figura 7.20).

El agua subterránea del acuífero adyacente al Río Santa Cruz en Tubac tiene valores de δ^{18} O y δ^{2} H que forman una tendencia lineal prácticamente idéntica a la del caudal base del río (Figura 7.20).

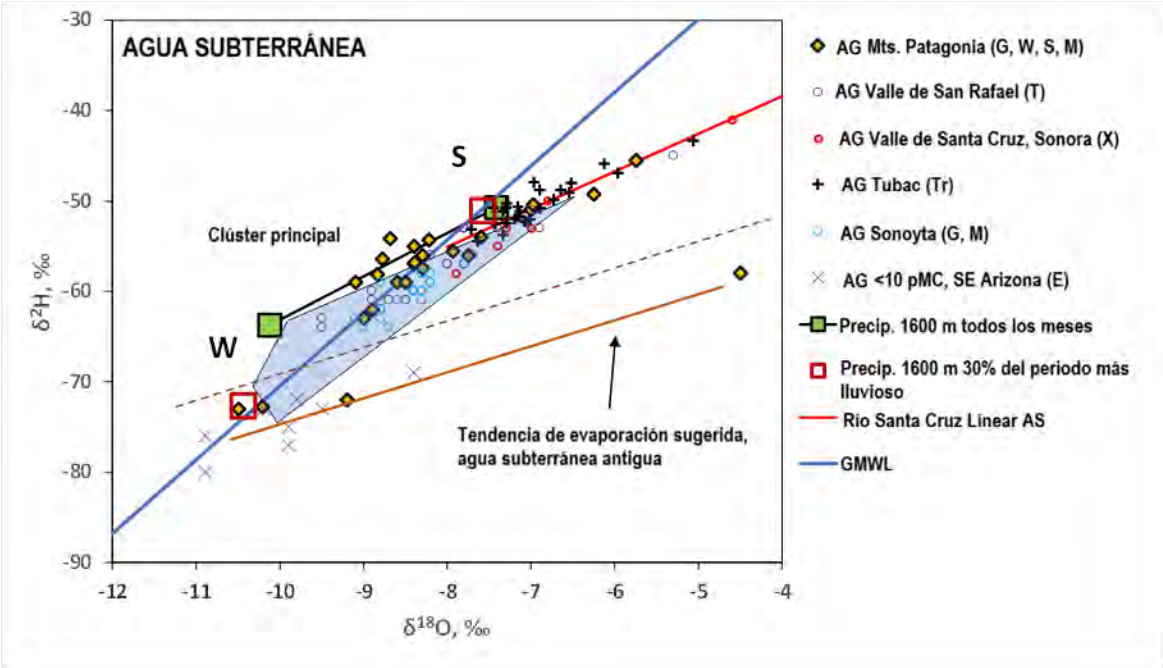


Figura 7.20 Gráfico de δ^{2} H frente a δ^{18} O para las aguas subterráneas (AG) de las Montañas Patagonia y las cuencas aluviales circundantes (San Rafael, Sonoita, valle del Río Santa Cruz, Sonora).

También se muestran las medias ponderadas por cantidad para las precipitaciones estacionales (S = verano; W = invierno), calculadas para todos los datos y para el 30 % de los meses más húmedos (véase Eastoe y Towne, 2018), la línea de tendencia del agua superficial evaporada (AS) en el Río Santa Cruz, la línea global del agua meteórica (GMWL) y los datos del agua subterránea antigua con ^{14}C con un contenido de carbono < 10 % del carbono moderno (pMC) en el sureste de Arizona. Fuentes de datos (leyenda, entre paréntesis): Eastoe (2023) y referencias en el mismo (E); Gu et al., (2008) (G); Montgomery et al., (2009) (M); Schrag-Toso, (2020) (S); Towne (2003) (T);

Treese et al., (2009) (Tr); Wanty et al., (2001) (W); IDEAS (2008). El polígono azul es el campo de mezcla de las aguas de las cuencas aluviales de los valles de San Rafael, Santa Cruz (Sonora) y Sonoita Creek.

Relaciones entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas

Los datos de isótopos estables de O e H son coherentes con una fuente común, es decir, las aguas subterráneas de montaña, para la mayoría de las aguas superficiales y subterráneas. Las diferencias isotópicas entre el agua subterránea más evaporada y menos evaporada en las cuencas altas reflejan distintas trayectorias evolutivas. El agua más evaporada, cuya composición isotópica se asemeja a la del agua superficial, experimentó evaporación en los cauces antes de infiltrarse. El agua menos evaporada, con una composición isotópica más cercana a la del agua subterránea de montaña, probablemente ingresó a los acuíferos aluviales como recarga de frente de montaña o de bloque de montaña. Las mezclas de los dos tipos de agua explican las series lineales de datos isotópicos en el valle de San Rafael y el acuífero Río Santa Cruz en Sonora.

7.7.2. Isótopoes de Sulfato

Los conjuntos de datos de Gu (2005), Gu et al. (2008) y Schrag-Toso (2020) incluyen valores emparejados de $\delta^{34}S$ y $\delta^{18}O_{SO4}$ para el sulfato en las aguas subterráneas y superficiales de las Montañas Patagonia, donde se produce el drenaje ácido de rocas que contienen sulfuros. Gu et al. (2008) también presentaron valores emparejados de δ^{34} S y δ^{18} O_{SO4} para las aguas subterráneas, incluyendo el suministro doméstico, en los aluviones alrededor de los flancos norte y oeste de las Montañas Patagonia, y el caudal base en los arroyos Sonoita y Harshaw. Ambos conjuntos de datos incluyen concentraciones de sulfato. Los datos se representan en la Figura 7.21.

El drenaje ácido de rocas en las Montañas Patagonia, presente tanto en aguas subterráneas como superficiales, presenta amplios rangos de δ^{34} S (-11 a +3‰), lo que refleja una amplia gama de δ^{34} S en el sulfuro de roca en el bloque montañoso, y las diferencias se producen entre volúmenes de roca lo suficientemente grandes como para causar diferencias en δ^{34} S entre pequeñas cuencas hidrográficas. El rango de δ^{18} O_{SO4} (-2 a +6‰) refleja la incorporación de oxígeno del agua meteórica local y de la atmósfera en diferentes proporciones; en el oeste de los Estados Unidos, el efecto del agua meteórica es dominante (Taylor et al., 1984), lo que da lugar a valores de $\delta^{18}O$ inferiores a 0‰ en el sur de Arizona (Gu y Eastoe, 2021). El drenaje ácido de rocas promedio con (δ^{34} S, δ^{18} O_{SO4}) que puede estar cerca de (-4, +1‰) representa el extremo inferior de una tendencia de mezcla que afecta al sulfato en las aguas superficiales del arroyo Sonoita y sus alrededores (Figura 7.21). El extremo superior está representado por el sulfato marino del Pérmico o del Cretácico temprano o equivalentes reelaborados, y está presente en las aguas subterráneas y las evaporitas de otras zonas del sur de Arizona (Gu y Eastoe, 2021). En la cuenca del arroyo Sonoita, la fuente parece ser la cuenca aluvial profunda al noreste del pueblo de Patagonia; las aguas

subterráneas con esta firma isotópica se descargan en el arroyo Sonoita cerca del pueblo (Gu et al., 2008).

El sulfato de las muestras del pozo del pueblo de Patagonia cambió considerablemente en su composición isotópica entre 1999 y 2003 (Figura 7.21). Este fue un período en el que se produjo una grave sequía, y el cambio en la composición isotópica del agua reflejó el cambio en la aportación de sulfato procedente del drenaje ácido de rocas en relación con el sulfato de las aguas subterráneas de origen marino del Pérmico. Durante el mismo período, la aportación de drenaje ácido de rocas cambió en menor medida en varios pozos de abastecimiento en la cuenca del arroyo Sonoita, en el lado de Arizona de la cuenca binacional. Esto se demostró utilizando gráficos de δ^{34} S frente a la concentración inversa de sulfato (Gu et al., 2008).

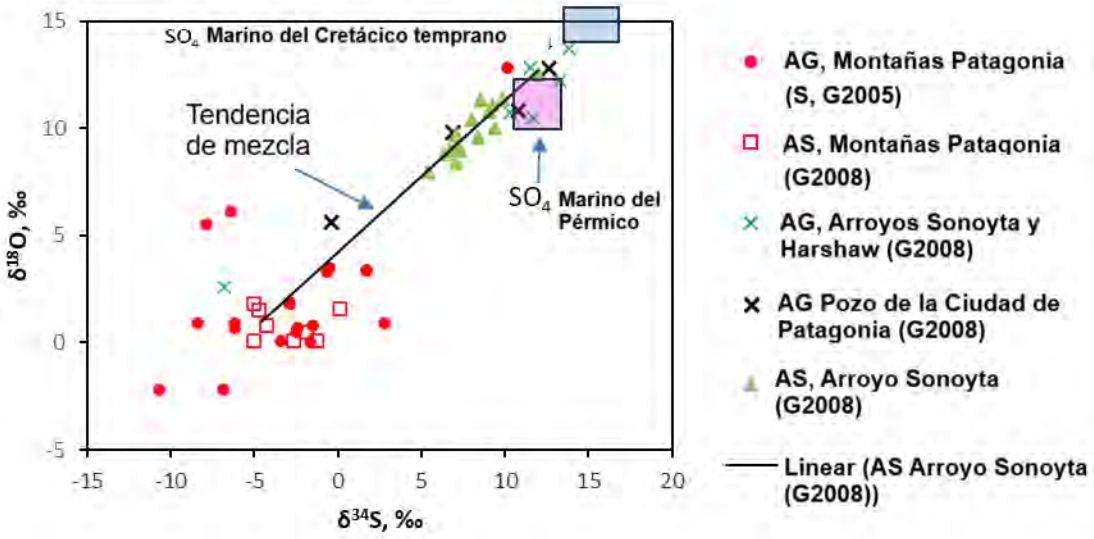


Figura 7.21 Gráfico de δ18 OSO4 frente a δ34 S para el sulfato disuelto en las aguas subterráneas (GW) y superficiales (SW) de las Montañas Patagonia y los acuíferos aluviales adyacentes.

Fuentes de datos (leyenda, entre paréntesis): Gu (2005); Gu et al. (2008); S: Schrag-Toso, (2020). Los rangos de sulfato marino del Pérmico y del Cretácico temprano proceden de Claypool et al. (1980).

7.8. Conclusiones y trabajo futuro

En este informe se presentó una evaluación de la calidad del agua y de las características hidroquímicas y geoquímicas del sistema transfronterizo Santa Cruz entre Estados Unidos y México, basada en estudios realizados por diversas entidades. A continuación, se presentan algunas conclusiones destacadas del capítulo, así como recomendaciones para trabajos futuros.

Conclusiones:

Las lecciones relevantes de las Montañas Patagonia y sus alrededores incluyen: 1) los fluidos hidrotermales asociados al emplazamiento de magmas granitoides han depositado concentraciones

de sulfuros de metales básicos (vetas, reemplazos y diseminaciones) dentro de una amplia zona de roca encajonante alterada hidrotermalmente que también contiene minerales de sulfuros de metales básicos diseminados (por ejemplo, hierro, níquel, plomo, zinc, cobre) ; 2) la roca encajonante alterada puede influir considerablemente en el flujo de las aguas subterráneas, ya que la alteración modifica las propiedades físicas de la roca ; y 3) la roca encajonante influye en la química y la calidad del agua al actuar como una fuente de gran volumen de posibles contaminantes.

En el lado sur del sistema de cuencas del arroyo Patagonia, la falla Patagonia forma el límite escarpado entre los sedimentos de la cuenca y las rocas ígneas del sistema montañoso principal (Menges, 1981). En este contacto, los sedimentos de la cuenca quedan expuestos a una altura de hasta 210 m sobre el fondo del valle. Al norte, en el lado del graben de Santa Rita, el basamento aflora abruptamente a lo largo de estructuras de fallas ocultas a lo largo de las orillas del arroyo Sonoita, en las elevaciones más bajas del valle. Esta configuración geológica del margen de la cuenca tiene implicaciones en los controles que gobiernan la geoquímica de las aguas del sistema de agua subterránea.

El análisis mediante diagramas de Stiff del agua subterránea aluvial de las tierras bajas muestra que las concentraciones más altas de HCO_3+CO_3 en las aguas subterráneas se observaron en la región de Sonora, particularmente en el pozo STC-10, cerca de la localidad de Santa Cruz. Es importante señalar que estos valores elevados se concentraron predominantemente alrededor de los arroyos y el río, lo que sugiere influencias localizadas. Por otro lado, se encontraron concentraciones más bajas cerca de las Montañas Tumacácori. Lasconcentraciones de cloruro representadas en los diagramas de Stiff se mantuvieron dentro de los límites máximos establecidos tanto por la NOM mexicana como por la EPA, sin embargo, algunas concentraciones de sulfato sí excedieron los estándares secundarios aplicables en ambas porciones del acuífero.

Según los datos de los isótopos estables d2H y d18O, el agua subterránea parece provenir de las precipitaciones en las montañas a través de la recarga de bloque de montaña y de frente montaña.

En la cuenca del arroyo Sonoita, según los datos de isótopos estables SO42-δ34S, el agua parece provenir en gran parte de la cuenca aluvial profunda al noreste del pueblo de Patagonia; el agua subterránea con esta firma isotópica se descarga en el arroyo Sonoita, cerca del pueblo.

Entre los posibles trabajos futuros se incluyen los siguientes:

Exploración y evaluación de otros proyectos y fuentes de datos potencialmente útiles que no se incluyeron en el presente informe. Uno de ellos comprende los datos diarios sobre la calidad del agua recopilados en la PITAR, que comenzaron en la década de 1970.

A pesar de las abundantes fuentes de datos disponibles para este informe, aún persisten vacíos de información binacional sobre el Cu, Pb, Zn y otros elementos, en particular los producidos por las actividades mineras en la región. Sería útil añadir un monitoreo de los metales procedentes de las actuales

explotaciones mineras en las Montañas Patagonia y, en el futuro, cuando comiencen las explotaciones en El Pilar, en Sonora, ya que los metales pueden tener un impacto significativo en la salud humana y acuática.

Un muestreo y análisis actualizados (incluido el modelado numérico) de las características geoquímicas de la zona de estudio podrían proporcionar información a los administradores de suelo y agua en los Estados Unidos como en México, que podría servir para la aplicación de métodos destinados a mejorar la calidad del agua en la TSCAS.

Se podrían realizar estudios geoquímicos binacionales coordinados simultáneamente tanto en los Estados Unidos como en México, asegurando que se sigan los mismos parámetros y criterios de muestreo a ambos lados de la frontera. La armonización de estos métodos mejoraría la coherencia y la comparabilidad de los datos entre los dos países.

Incorporar el análisis isotópico como parte de futuros estudios geoquímicos para proporcionar una visión más profunda de las fuentes y las vías de los contaminantes en la región. Los datos isotópicos pueden complementar los métodos geoquímicos tradicionales al ayudar a rastrear las fuentes de contaminación y su movimiento a través de la cuenca hidrográfica.

Se podría implementar un monitoreo anual del acuífero para evaluar los cambios continuos en la calidad del agua y los posibles impactos de la minería y otras actividades a ambos lados de la frontera.

Bibliografía

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), 2024, Normas secundarias para el agua potable: Guía para sustancias químicas nocivas, USEPA, 2024. Consultado el 24 de julio de 2024 en https://www.epa.gov/sdwa/secondary-drinking-water-standards-guidance-nuisance-chemicals#what-are-secondary.

Anderson, M. P., 2005, Heat as a ground water tracer, Groundwater, 43, 951–961, https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x.

Anderson, M. P., Woessner, W. W., Hunt, R.H., 2015, Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Volume 2. Consultado el 3 de abril de 2025 en https://archive.org/details/appliedgroundwat0002ande/page/n5/mode/2up (puede requerir compra).

Arizona Department of Environmental Quality (ADEQ). 2003. Ambient Groundwater Quality of the San Rafael Basin: A 2002 Baseline Study, Open File Report 2003-01. Consultado el 3 de abril de 2025 en https://legacy.azdeq.gov/environ/water/assessment/download/srfact.pdf.

Arizona Department of Environmental Quality (ADEQ). 2019. Upper Santa Cruz River Subwatershed Clean Water Plan (Final Draft). Arizona Department of Environmental Quality. https://static.azdeq.gov/wqd/swqip/uscr_cwp_finaldraft_061419.pdf

Balistrieri, L.S., Foster, A.L., Gough, L.P., Gray, F., Rytuba, J.J. y Stillings, L.L., 2007, Understanding metal pathways in mineralized ecosystems: U.S. Geological Survey Circular 1317, 12 p. Consultado el 3 de abril de 2025 en https://pubs.usgs.gov/circ/2007/1317/C1317.pdf.

Blake G.R. y otros, 2008, Potassium cycle, contained in Chesworth W. (eds) Encyclopedia of Soil Science, Encyclopedia of Earth Sciences Series, Springer, Dordrecht. Consultado el 3 de abril de 2025 en https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_461.

Blasch, K. W., Constantz, J., Stonestrom, D.A., 2007, Thermal Methods for Investigating Ground-Water Recharge, USGS Numbered Series 1703–1. Thermal Methods for Investigating Ground-Water Recharge, Vol. 1703–1, Professional Paper, https://doi.org/10.3133/pp17031.

Brady, L. M. (2000). GIS analysis of spatial variability of contaminated watershed components in a historically mined region, basin and range province, Southeast Arizona. Master thesis, University of Arizona, 127 p. Tucson, Arizona.

Brady, L. M., Gray, F., Wissler, C., Guertin, P., 2001, GIS Analysis of Spatial Variability of Contaminated Watershed Components in a Historically Mined Region, Patagonia Mountains, Arizona. USGS Open-File Report 2001-267: https://doi.org/10.3133/ofr01267

Callegary, J. B., Megdal, S. B., Villaseñor, E. T., Petersen-Perlman, J. D., Sosa, I. M., Monreal, R., ... & Noriega, F. G. (2018). Findings and lessons learned from the assessment of the Mexico-United States transboundary

San Pedro and Santa Cruz aquifers: The utility of social science in applied hydrologic research. Journal of Hydrology: Regional Studies, 20, 60-73.

Chaffee, M.A., 1990, Geochemistry, in Peterson, J.A., ed., Preliminary mineral resource assessment of the Tucson and Nogales 1° by 2° quadrangles, Arizona: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-0276, p. 19-40. Consultado el 3 de abril de 2025 en https://pubs.usgs.gov/of//1990/0276/report.pdf.

Chaffee, M.A., 2020, Geochemical and mineralogical study of the Red Mountain porphyry copper-molybdenum deposit and vicinity, Santa Cruz County, Arizona: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2019–5077, 164 p., https://doi.org/10.3133/sir20195077.

Chaffee, M.A., Hill, R.H., Sutley, S.J., Watterson, J.R., 1981, Regional geochemical studies in the Patagonia Mountains, Santa Cruz County, Arizona. Journal of Geochemical Exploration, Volume 14, p. 135-153, https://doi.org/10.1016/0375-6742(81)90109-6.

Chatman, M. L., 1994. Mineral appraisal of Coronado National Forest, part 7, Patagonia Mountains-Canelo Hills Unit, Cochise and Santa Cruz Counties, AZ MLA 22-94. Consultado el 3 de abril de 2025 en https://repository.arizona.edu/handle/10150/629834.

Clark I.D., Fritz P., 1997, Environmental isotopes in hydrogeology, Lewis Publishers, New York.

Claypool, G.E.; Holser, W.T.; Kaplan, I.R.; Sakai, H.; Zak, I., 1980, The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation. Chem. Geol., 28, 199–260, https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90047-9.

Coes, A., Gellenbeck, D.J., Towne, D.C., Freark, M.C., 2000, Ground-Water Quality in the Upper Santa Cruz Basin, Arizona, 1998, Water-Resources Investigations Report 00-4117, Tucson, AZ: U.S. Geological Survey, https://doi.org/10.3133/wri004117.

Comisión Internacional de Límites y Aguas (IBWC), 2001, Programa binacional de monitoreo de aguas subterráneas de Nogales Wash, Estados Unidos/México. Consultado el 7 de abril de 2025 a través de un enlace en https://www.ibwc.gov/reports-studies/.

Comisión Internacional de Límites y Aguas (IBWC), 2009, Obras de cabecera del NIWTP (Informe n.º 040109). Sección estadounidense, Comisión Internacional de Límites y Aguas. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://ibwc.azurewebsites.net/wp-content/uploads/2023/06/NIWTP_Headworks_040109.pdf.

Comisión Internacional de Límites y Aguas (IBWC), 2020, Oficina de Nogales y Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (NIWTP). Consultado el 7 de abril de 2025 en https://www.ibwc.gov/wastewater-treatment-plants/#niwtp.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2009, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Nogales (2650), estado de Sonora. Consultado el 3 de abril de 2025 en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/104349/DR_2650.pdf.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015, Actualización de La Disponibilidad Media Anual de Agua En El Acuífero Río Santa Cruz (2615) Estado de Sonora. Consultado el 15 de diciembre de 2020 en https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2615.pdf.

Corn, R. M., 1975, Alteration-mineralization zoning. Red Mountain, Arizona: Econ. Geol., v. 70, p. 1437-1447, https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.8.1437.

Custodio, E., Llamas, M.R., 1996, Hidrología Subterránea. - Tomo I y II. Ed. Omega, Barcelona España. 2.ª

Dean, S.A., 1982, Acid drainage from abandoned metal mines in the Patagonia Mountains of Southern Arizona, Tesis, Universidad de Arizona, Facultad de Recursos Naturales Renovables, 152 p. Consultado el 3 de abril de 2025 en http://hdl.handle.net/10150/191766.

Department of Energy (DOE), 1994, Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water; version 2, A. G. Dickson & C. Goyet, eds., ORNL/CDIAC-74. Consultado el 3 de abril de 2025 en https://www.ncei.noaa.gov/access/ocean-carbon-acidification-data-system/oceans/handbook.html.

Domenico, P.A., and Schwartz, F.W., 1990, Physical and chemical hydrogeology: John Wiley and Sons, New York, 824 pp.

Dowman, C., Ferré, Ty P.A., Hoffmann, J., Rucker, D., Callegary, J., 2003, Quantifying Ephemeral Streambed Infiltration from Downhole Temperature Measurements Collected Before and After Streamflow, Vadose Zone Journal - VADOSE ZONE J 2 (noviembre): 595-601. https://doi.org/10.2113/2.4.595

Drever, J.I. (1997) The Geochemistry of Natural Waters. 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 436 p.

Drever, J.I. 1997. The Geochemistry of Natural Waters. 3rd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, 436 p.

Drewes, H., 1971, Mesozoic stratigraphy of the Santa Rita Mountains, southeast of Tucson, Arizona: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 658-C, 81 p.

Drewes, H., 1971, Mesozoic stratigraphy of the Santa Rita Mountains, southeast of Tucson, Arizona: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 658-C, 81 p.

Drewes, H., 1972a. Cenozoic rocks of the Santa Rita Mountains, southeast of Tucson, Arizona. Professional Paper. https://doi.org/10.3133/pp746

Drewes, H., 1972b. Structural Geology of the Santa Rita mountains, southeast of Tucson, Arizona. Professional Paper. https://doi.org/10.3133/pp748

Drewes, H., 1980. Tectonic map of southeast Arizona: US Geological Survey. Miscellaneous Investigations Series Map I-1109, scale, 1(125,000), https://pubs.usgs.gov/publication/i1109

du Bray, E.A., (ed.), 1996, Mineral Resources and Geology of Coronado National Forest, southeastern Arizona and southwestern New Mexico: U.S. Geological Survey Bulletin 2083-A, 222 p., 32 plates.

Earman, S. 2004. “Groundwater Recharge and Movement through Mountain-Basin Systems of the Southwest: A Case Study in the Chiricahua Mountains-San Bernardino Valley System, Arizona and Sonora.” Socorro,

New Mexico, USA: New Mexico Inst. Mining Technol. http://www.ees.nmt.edu/outside/alumni/papers/2004d_earman_sb.pdf.

Eastoe, C. J., 2007, Report on an Isotope Study of Groundwater from the Mogollon Highlands Area and Adjacent Mogollon Rim, Gila County, Arizona. Geology and Structural Controls of Groundwater, Mogollon Rim Water Resources Management Study. Town of Payson Water Department. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://www.geo.arizona.edu/sites/www.geo.arizona.edu/files/Eastoe_2007_MRWRMS.pdf.

Eastoe, C. J., Dettman, D.L., 2016, Isotope Amount Effects in Hydrologic and Climate Reconstructions of Monsoon Climates: Implications of Some Long-Term Data Sets for Precipitation, Chemical Geology 430 (julio): 78–89. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.03.022.

Eastoe, C. J., Wright, W. E., 2019, Hydrology of mountain blocks in Arizona and New Mexico as revealed by isotopes in groundwater and precipitation. Geosciences (Switzerland), 9(11). https://doi.org/10.3390/geosciences9110461

Eastoe, C.J., 2023, Isotope record of groundwater recharge mechanisms and climate change in southwestern North America, Applied Geochemistry, https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105604.

Eastoe, C.J., and Towne, D., 2018, Regional Zonation of Groundwater Recharge Mechanisms in Alluvial Basins of Arizona: Interpretation of Isotope Mapping, Journal of Geochemical Exploration 194 (julio). https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.07.013.

Eastoe, C.J., Gu, A., Long, A., 2004, The Origins, Ages and Flow Paths of Groundwater in Tucson Basin: Results of a Study of Multiple Isotope Systems, Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States, 217–34. American Geophysical Union (AGU). https://doi.org/10.1029/009WSA12.

Eastoe, C.J., Watts, C.J., Ploughe, M., Wright, W.E., 2011, Future use of tritium in mapping pre-bomb groundwater volumes. Ground Water, 50: 87-93, https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00806.x.

Eddleman, K., 2012, Bioaccumulation of Heavy Metals From Soils to Plants in Watersheds Contaminated by Acid Mine Drainage in SE Arizona, The University of Arizona, Department of General Biology, Master Thesis, 180 p. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://repository.arizona.edu/handle/10150/265334.

Elango, L., Kannan, R., 2007, Rock-Water Interaction and Its Control on Chemical Composition of Groundwater. In D. Sarkar, R. Datta, & R. Hannigan (Eds,), Developments in Environmental Science (Vol. 5, pp. 229-243). Amsterdam: Elsevier. https://doi.org/10.1016/S1474-8177(07)05011-5.

Enders, M.S., 2000, The Evolution of Supergene Enrichment in the Morenci Porphyry Copper Deposit, Greenlee County, Arizona. Ph.D. Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://www.geo.arizona.edu/Antevs/Theses/Enders/DISSERTATION_TEXT_PDF.PDF.

Environmental Protection Agency (EPA), 2016, National Primary Drinking Water Regulations. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations.

Fetter, C.W., 2001, Applied Hydrogeology. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 598 p.

Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979, Groundwater: Prentice Hall, Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 604 pp.

Gerencia de Aguas Subterráneas - Comisión Nacional del Agua (GAS-CONAGUA), 2024, Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Río Santa Cruz (2615), estado de Sonora, Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Consultado el 3 de abril de 2025 en https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2615.pdf.

Giardina, Jr., S., Conley, J.N., 1978. «Anomalías en el gradiente térmico del sur de Arizona». Comisión de Conservación de Petróleo y Gas de Arizona. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://repository.arizona.edu/handle/10150/630678.

Gray, F., Gu, A., Bliss, J., Oscar D., Norman, L., Hirschberg, D., Ashton, K., 2004, Dos ejemplos de procesos geoquímicos en terrenos mineros abandonados en las montañas de la Patagonia: Extremos para la modelización de la dispersión de metales en cuencas hidrográficas semiáridas de montaña: Arizona. Presentado en la reunión mensual de la Sociedad Geológica, junio de 2004, Tucson, Arizona.

Gray, F., Wirt, L., Caruther, K., Bolm, K., Chaffee, M., 1998, Química de origen de las aguas de los arroyos con pH bajo y concentraciones elevadas de metales, Patagonia y sur de las Montañas Santa Rita, condado de Santa Cruz, Arizona: Implicaciones para los impactos en las cuencas del arroyo Sonoita y del Río Santa Cruz superior. Presentado en la 9.ª Conferencia de los Estados Fronterizos de EE. UU. y México sobre Recreación, Parques y Vida Silvestre de la Asociación de Parques y Vida Silvestre ( ), Tucson, Arizona, 3-6 de junio.

Gray, F., Wirt, L., Caruthers, K., Gu, A., Vélez, C., Hirschberg, D., Bolm, K., 2000, Transporte y destino del agua rica en Zn y Cu y con bajo pH en aguas superficiales y subterráneas procedentes de depósitos de cobre porfídico y minerales relacionados, provincia de Basin and Range, sureste de Arizona: Actas, Quinta Conferencia Internacional sobre Drenaje Ácido de Rocas (ICARD), 21-24 de mayo, Denver, CO., v. 1, p. 411-430.

Graybeal, F.T., 1984, Zonificación de metales en las montañas de Patagonia, Arizona: Arizona Geological Society Digest 15, p. 187-197.

Graybeal, F.T., 1996, Sunnyside, un sistema de pórfido de cobre conservado verticalmente, montañas de Patagonia, Arizona: Boletín de la Sociedad de Geólogos Económicos, n.º 26, p. 1, 10-14, https://doi.org/10.5382/SEGnews.1996-26.fea.

Graybeal, F.T., Moyer, L.A., Vikre, P.G., Dunlap, Pamela y Wallis, J.C., 2015, Mapa geológico de las montañas Patagonia, condado de Santa Cruz, Arizona: Informe de archivo abierto del Servicio Geológico de los

Estados Unidos 2015-1023, folleto de 10 p. y datos digitales, escala 1:48 000, http://dx.doi.org/10.3133/ofr20151023.

Gu, A. y Eastoe, C.J., 2021. Los orígenes del sulfato en las evaporitas no marinas del Cenozoico en la provincia Basin and Range, suroeste de América del Norte. Geosciences 11 (11):455. https://doi.org/10.3390/geosciences11110455

Gu, A., 2005, Geoquímica de isótopos estables del sulfato en las aguas subterráneas del sur de Arizona: implicaciones para el flujo de las aguas subterráneas, las fuentes de sulfato y la importancia medioambiental. Tesis doctoral, Universidad de Arizona, Tucson, AZ, EE. UU. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://repository.arizona.edu/handle/10150/191273.

Gu, Ailiang, Floyd Gray, Christopher J. Eastoe, Laura M. Norman, Oscar Duarte y Austin Long. 2008. «Seguimiento de la aportación de agua subterránea al caudal base mediante isótopos de sulfato (S, O)». Groundwater 46 (3): 502-9. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00437.x

Gungle, B., James B.C., Nicholas V.P., Jeffrey R.K., Eastoe, C.J., Turner D.S., Dickinson, J.E., Levick, L.R., Sugg, Z.P., 2016, Condiciones hidrológicas y evaluación del uso sostenible de las aguas subterráneas en la subcuenca de Sierra Vista, cuenca alta del San Pedro, sureste de Arizona. Serie numerada del USGS 2016-5114. Vol. 2016-5114. Informe de investigaciones científicas. Reston, Virginia: Servicio Geológico de los Estados Unidos. https://doi.org/10.3133/sir20165114.

Hem, J.D., 1985, Estudio e interpretación de las características químicas del agua natural, Servicio Geológico de los Estados Unidos, Abastecimiento de agua 2254. Servicio Geológico de los Estados Unidos, https://doi.org/10.3133/wsp2254.

Hopkins, C., Mcintosh, J., Eastoe, C.J., Dickinson, J.E., Meixner, T., 2013, Evaluación de la importancia de las unidades de confinamiento de arcilla en el flujo de agua subterránea en cuencas aluviales utilizando trazadores de solutos e isótopos: el caso de la cuenca media del San Pedro en el sureste de Arizona (EE. UU.), Hydrogeology Journal 22 (diciembre). https://doi.org/10.1007/s10040-013-1090-0.

Horton, J.D., San Juan, C.A., Chaffee, M.A., 2020, Datos que acompañan al Informe de Investigaciones Científicas 2019-5077 del Servicio Geológico de los Estados Unidos: Estudio geoquímico y mineralógico del yacimiento de pórfido de cobre y molibdeno de Red Mountain y sus alrededores, condado de Santa Cruz, Arizona: publicación de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos, https://doi.org/10.5066/P9BS56JZ.

Hyde, P., 1995 , Calidad del agua en el campamento de la trinchera, montañas de Patagonia, condado de Santa Cruz, Arizona. 3-4 de abril de 1995, Informe del Departamento de Calidad Ambiental de Arizona, Sección de Protección de Acuíferos. Informe interno no publicado, pp. 1-15.

Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS), 2008, Estudio Regional de Evaluación Hidrogeológica del Acuífero Santa Cruz, Municipios Santa Cruz y Nogales, Sonora.

Keith, S.B., 1975, Índice de propiedades mineras en el condado de Santa Cruz, Arizona, Boletín de la Oficina de Minas de Arizona-191, 100 p. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://repository.arizona.edu/handle/10150/628922.

Keith, S.B., Swan, M.M., 1996, El gran grupo de pórfidos de cobre de Laramide en Arizona, Sonora y Nuevo México: El entorno tectónico, la petrología y la génesis de un grupo de metales porfídicos de clase mundial, en Coyner, A.R. y Fahey, P.L., eds., Geología y yacimientos minerales de la Cordillera Americana: Reno-Sparks, Nevada, Actas del Simposio de la Sociedad Geológica de Nevada, abril de 1995, p. 1667-1747.

Keys, W.S., 1990, Geofísica de sondeos aplicada a investigaciones de aguas subterráneas: Técnicas de investigación de recursos hídricos del Servicio Geológico de los Estados Unidos, libro 2, cap. E2, 150 p.

King, A.K., Zaun, B.J., Velasco, A.L., 1999, Los contaminantes como factor limitante de las poblaciones de peces y fauna silvestre en el río Santa Cruz, Arizona, Servicio de Pesca y Fauna Silvestre de los Estados Unidos, Región 2, Programa de Contaminantes. p. 69. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://www.researchgate.net/publication/354555589.

Krouse, H.R., Coplen, T.B. 1997. Notificación de datos relativos a la relación isotópica del azufre (Informe técnico). Química orgánica física para el sigloXXI. Química pura y aplicada. Vol. 69, número 2, p. 293.

Lecumberri-Sánchez, P., Newton III, C. M., Westman, E. C., Kamilli, R. J., Canby, V. M., Bodnar, R. J., 2013, Distribución temporal y espacial de la alteración, mineralización e inclusiones fluidas en el sistema epitermal-porfídico de cobre de alta sulfuración transicional en Red Mountain, Arizona: Journal of Geochemical Exploration 125, p. 80-93. https://doi.org/10.1016/J.GEXPLO.2012.11.017.

Lide, D.R. (ed.), 2005, Sección 14, Geofísica, astronomía y acústica; Abundancia de elementos en la corteza terrestre y en el mar. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85.ª edición. CRC Press. Boca Ratón, Florida.

Limaye, S.D., 2010. Desarrollo sostenible de las aguas subterráneas en acuíferos de roca dura en países de bajos ingresos y el papel del proyecto «GROWNET» de la UNESCO, la IUGS y el IGCP. Iranian Journal of Earth Sciences 2: 1-9. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://oiccpress.com/ijes/article/view/5680/2371 .

Lucas, L.L., Unterweger, M.P., 2000, Revisión exhaustiva y evaluación crítica de la vida media del tritio, Revista de Investigación del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología. Vol. 105, Número 4, pp. 541-549. DOI: 10.6028/jres.105.043.

McOmber, T.C., 2014, Evaluación de la calidad del agua del río Santa Cruz en el sur de Arizona. Tesis electrónica publicada por la Universidad de Arizona. Consultado el 7 de abril de 2025 en http://hdl.handle.net/10150/319998.

Menges, C., 1981, La cuenca del arroyo Sonoita: implicaciones para la evolución tectónica del Cenozoico tardío de las cuencas y cordilleras del sureste de Arizona. Tesis de máster, Departamento de Geociencias,

Universidad de Arizona. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://repository.arizona.edu/handle/10150/557749.

Miao, Z., Brusseau, M.L., Carroll, K.C., Carreón-Diazconti, C., Johnson, B., 2012, Reducción de sulfatos en aguas subterráneas: caracterización y aplicaciones para la remediación, Environmental Geochemistry and Health 34 (4): 539-50. https://doi.org/10.1007/s10653-011-9423-1.

Minjarez Sosa, I., Monreal Saavedra, R., Rangel Medina, M., Grijalva Noriega, F., Ochoa Granillo, A., Tapia Villaseñor, E.M., Ramírez Díaz, L.L., Cirett Galán, S.E., Moncada García, G., Monijo González, A., 2011, Actividades hidrogeológicas en el acuífero Río Santa Cruz, estado de Sonora, primera etapa. Hermosillo, México: Universidad de Sonora. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://docslib.org/doc/6055430/actividades-hidrogeol%C3%B3gicas-en-el-acu%C3%ADfero-r%C3%ADo-santa-cruz-estado-de-sonora-primera-etapa .

Montgomery, E. L., and Associates Inc., 2009, Resultados de la fase 2 de las investigaciones hidrogeológicas y del programa de seguimiento, Proyecto Rosemont, condado de Pima, Arizona. Vol. 1. Informe elaborado para Rosemont Copper Company, Tucson, Arizona: Errol L. Montgomery and Associates. Consultado el 20 de diciembre de 2020 en https://www.rosemonteis.us/sites/default/files/technical-reports/012065.pdf.

Mullaney, J.R., David L.L., Arntson, A.D., 2009, Cloruro en aguas subterráneas y superficiales en áreas sustentadas por el sistema acuífero glacial, norte de Estados Unidos, Informe de investigaciones científicas. 2009–5086, Departamento del Interior de los Estados Unidos, Servicio Geológico de los Estados Unidos, consultado el 7 de abril de 2025 en https://pubs.usgs.gov/sir/2009/5086/.

Norman, L.M., Caldeira, F., Callegary, J., Gray, F., O'Rourke, M.K., Meranza, V. Van Rijn, S., 2012 , Análisis socioambiental de la salud en Nogales, Sonora, México. Calidad del agua, exposición y salud 4:79-91. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://link.springer.com/article/10.1007/s12403-012-0067-x.

Norman, L.M., Floyd G., Guertin, D.P., Wissler, C., Bliss, J.D., 2008, Seguimiento del drenaje ácido de minas en el sureste de Arizona mediante SIG y modelos de transporte de sedimentos, Environmental Monitoring and Assessment 145 (1-3): 145-57, https://doi.org/10.1007/s10661-007-0024-5.

Paretti, N.V ., Callegary, J.B., Gray, F., van Riper, C., 2010, «Occurrence, Fate, and Bioaccumulation of Organic and Inorganic Contaminants from Multiple Sources in the Upper Santa Cruz Watershed» (Presencia, Presentado en destino y bioacumulación de contaminantes orgánicos e inorgánicos procedentes de múltiples fuentes en la cuenca alta del río Santa Cruz). la conferencia: Actas de la Sociedad Hidrológica de Arizona, Simposio Anual, Tucson, Arizona.

Paretti, N.V., Kephart, C.M., Porter, T.J., Hermosillo, E., Cederberg, J.R., Mayo, J.P., Gungle, B., Coes, A.L., Tucci, R.S., Norman, L.M., 2019, Distribución espacial y temporal de indicadores bacterianos y seguimiento de fuentes microbianas en el Parque Histórico Nacional Tumacácori y la cuenca alta del río

Santa Cruz, sur de Arizona y norte de México, 2015-2016: Informe de Investigaciones Científicas del Servicio Geológico de los Estados Unidos 2019-5108, 102 p., https://doi.org/10.3133/sir20195108.

Peterson, J.A., ed., 1990. Evaluación preliminar de los recursos minerales de los cuadrángulos 1ºx2º de Tucson y Nogales, Arizona: Informe de archivo abierto 90-0276 del Servicio Geológico de los Estados Unidos, 134 p., 24 hojas, escala 1:250 000, https://doi.org/10.3133/ofr90276.

Plumlee, G.S., 1999, La geología ambiental de los yacimientos minerales, en Plumlee, G.S., y Logsdon, M.J., eds., La geoquímica ambiental de los yacimientos minerales, Parte A: Procesos, técnicas y cuestiones de salud: Revisiones en Geología Económica, v. 6A, p. 71-116.

Pool, D.R., Coes, A.L., 1999, Investigaciones hidrogeológicas de la subcuenca Sierra Vista de la cuenca alta del San Pedro, condado de Cochise, sureste de Arizona, Informe de investigaciones sobre recursos hídricos 99-4197, https://doi.org/10.3133/wri994197

Rakovan, J., 2003. A word to the wise: hypogene & supergene, Rocks & Minerals, 78:419–419, https://doi.org/10.1080/00357529.2003.9926759

Rankama, K., Sahama, Th. G., 1950, Geochemistry: A Survey of the Chemistry of the Earth, Chicago: Univ. Chicago Press, 912 pp. https://doi.org/10.1126/science.112.2907.315.a.

Robertson, F.N., 1991, Geochemistry of ground water in alluvial basins of Arizona and adjacent parts of Nevada, New Mexico, and California: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1406-C, https://doi.org/10.3133/pp1406C.

Schrader, F. C., 1915, Yacimientos minerales de las montañas Santa Rita y Patagonia, Arizona, con contribuciones de J. M. Hill: U.S. Geol. Survey Bull. 582, 373 p. https://doi.org/10.3133/b582.

Schrag-Toso, S., 2020, Isótopos, geoquímica, ciencia ciudadana y asociaciones locales como herramientas para construir una comprensión fragmentada de la hidrología de las montañas de Patagonia, Tucson: CLIMAS. 2020. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://climas.arizona.edu/publication/isotopes-geochemistry-citizen-science-and-local-partnerships-tools-build-upon-fractured.

Simons, F.S.,1974, Geologic map and sections of the Nogales and Lochiel quadrangles, Santa Cruz County, Arizona: U.S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Series Map I-762, 9 p., 1 sheet, scale 1:48,000

Smalley, R.C., 1983, An Isotopic and Geochemical Investigation Of The Hydrogeologic And Geothermal Systems In The Safford Basin, Arizona, 102. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://repository.arizona.edu/handle/10150/557978.

Stumm, W.; Morgan, J.J. Química acuática: equilibrios químicos y velocidades en aguas naturales, Wiley-Interscience: Nueva York, NY, EE. UU., 1970

Taylor, B.E.; Wheeler, M.C.; Nordstrom, D.K., 1984, Composición isotópica del sulfato en el drenaje ácido de minas como medida de la oxidación bacteriana, Nature, 308, 538-541, http://dx.doi.org/10.1038/308538a0.

Terrell, C.R., Perfetti, P., 1989, Guía de indicadores de calidad del agua: aguas superficiales, Washington D.C., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación del Suelo, 129 p. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/1474.

Towne, D.C., 2003, Calidad ambiental de las aguas subterráneas de la cuenca de San Rafael: estudio de referencia de 2002. Departamento de Calidad Ambiental de Arizona, Phoenix, Open File Rep. 03-01, 42 p. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://static.azdeq.gov/wqd/gw/fs/03-01_sanrafaelbasin_ofr.pdf.

Treese, S., Meixner, T., Hogan, J.F., 2009, Obstrucción de un río semiárido dominado por efluentes: un modelo conceptual de las interacciones entre el cauce y el acuífero, JAWRA Journal of the American Water Resources Association 45 (4): 1047-62, https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00346.x.

Tucci, R.S. 2018, Uso de isótopos y trazadores de solutos para inferir la recarga y el flujo de aguas subterráneas en la cuenca del arroyo Cienega, sureste de Arizona, tesis de maestría en la Universidad de Arizona. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://repository.arizona.edu/handle/10150/628442.

Utilización de las aguas de los ríos Colorado y Tijuana y del Río Grande. 1944. Tratado entre los Estados Unidos de América y México. Serie de tratados 994, firmado el 3 de febrero de 1944. Consultado el 18/12/2024 en https://www.ibwc.gov/treaties/.

Vikre, P.G., Graybeal, F.T., Fleck, R.J., Barton, M.D., Seedorff, E., 2014, Sucesión de eventos magmáticos y magmático-hidrotermales laramídicos en las montañas de Patagonia, condado de Santa Cruz, Arizona: Economic Geology, v. 109, p. 1667-1704. https://doi.org/10.2113/econgeo.109.6.1667.

Wagner, J.D.M., Cole, J.E., Beck, J.W., Patchett, P.J., Henderson, G.M., Barnett, H.R., 2010, Variabilidad de la humedad en el suroeste de Estados Unidos relacionada con el cambio climático glacial abrupto, Nature Geoscience 3 (2): 110-13. https://doi.org/10.1038/ngeo707.

Wanty, R.B., Shanks III, W.C., Lamothe, P., Meier, A.L., Lichte, F., Briggs, P.H., Berger, B.R., 2001, Resultados de los análisis químicos y de isótopos estables de muestras de agua recogidas en las montañas de Patagonia, sur de Arizona, USGS Numbered Series 2001–463. Resultados de los análisis químicos y de isótopos estables de muestras de agua recogidas en las montañas de Patagonia, sur de Arizona. Vol. 2001–463. Informe de archivo abierto. https://doi.org/10.3133/ofr01463.

Weiner E.R., 2012, Aplicaciones de la química acuática ambiental: una guía práctica. CRC Press, Florida, EE. UU.

8. MODELOS CONCEPTUALES Y NUMÉRICOS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÓDINAMICO

En este capítulo se presentan los modelos conceptuales y numéricos disponibles que describen el flujo de agua subterránea dentro del Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (TSCAS) (Figura 8.1), se identifican los vacíos de conocimiento y se plantean las líneas de investigación para abordarlos. El comportamiento hidrodinámico del TSCAS está determinado por factores como la geología, el clima y el tiempo, junto con factores determinados por el ser humano, como el bombeo de agua subterránea. En conjunto, controlan las precipitaciones, la vegetación, la infiltración, la escorrentía y el flujo y almacenamiento de agua subterránea.

8.1. Recarga y Descarga de Acuíferos

La recarga del TSCAS varía temporal y espacialmente y depende de factores como la geología, el clima y la topografía (Eastoe y Wright, 2019; Markovich et al., 2019). La principal fuente de recarga del TSCAS es la precipitación (CONAGUA), 2024a, aunque algunas transferencias se derivan de agua del acuífero adyacente del Río Alisos en Sonora, México (Figura 8.1) (Tapia-Villaseñor et al., 2020). La mayor parte de las precipitaciones en el TSCAS caen en elevaciones más altas, donde la mayor parte de la recarga también se produce a través de la infiltración y la percolación profunda en el lecho rocoso, en parte a través de fallas y fracturas (Eastoe y Wright, 2019; Earman et al., 2006; Scanlon et al., 2006). Los flujos más elevados tienden a producirse a través de rocas permeables como la arenisca y la caliza (Flint y Flint, 2007). La recarga también se produce en el frente de la montaña y en altitudes más bajas, en lugares donde el agua se concentra y los sedimentos permeables facilitan la infiltración, como en arroyos y ríos perennes y en canales efímeros. La información de Eastoe y Wright (2019), así como el análisis isotópico del Capítulo 7, indican que la recarga de las montañas en la zona de estudio se deriva, en general, por igual de las precipitaciones de verano y de invierno.

En general, el agua subterránea que se desplaza hacia elevaciones más bajas se descarga a lo largo de los principales ríos, ya sea en el acuífero fluvial o, dependiendo de la elevación del nivel freático, como flujo de agua superficial (Nelson, 2007). Dentro del TSCAS, las elevaciones más bajas en los tramos del Río Santa Cruz y sus afluentes actúan como puntos de descarga (Figura 8.1). Otros tipos de descarga que se producen en el TSCAS son el bombeo de pozos, la transpiración de la vegetación ribereña y los manantiales en los cañones que atraviesan capas de arenisca o caliza que recubren capas de baja permeabilidad.

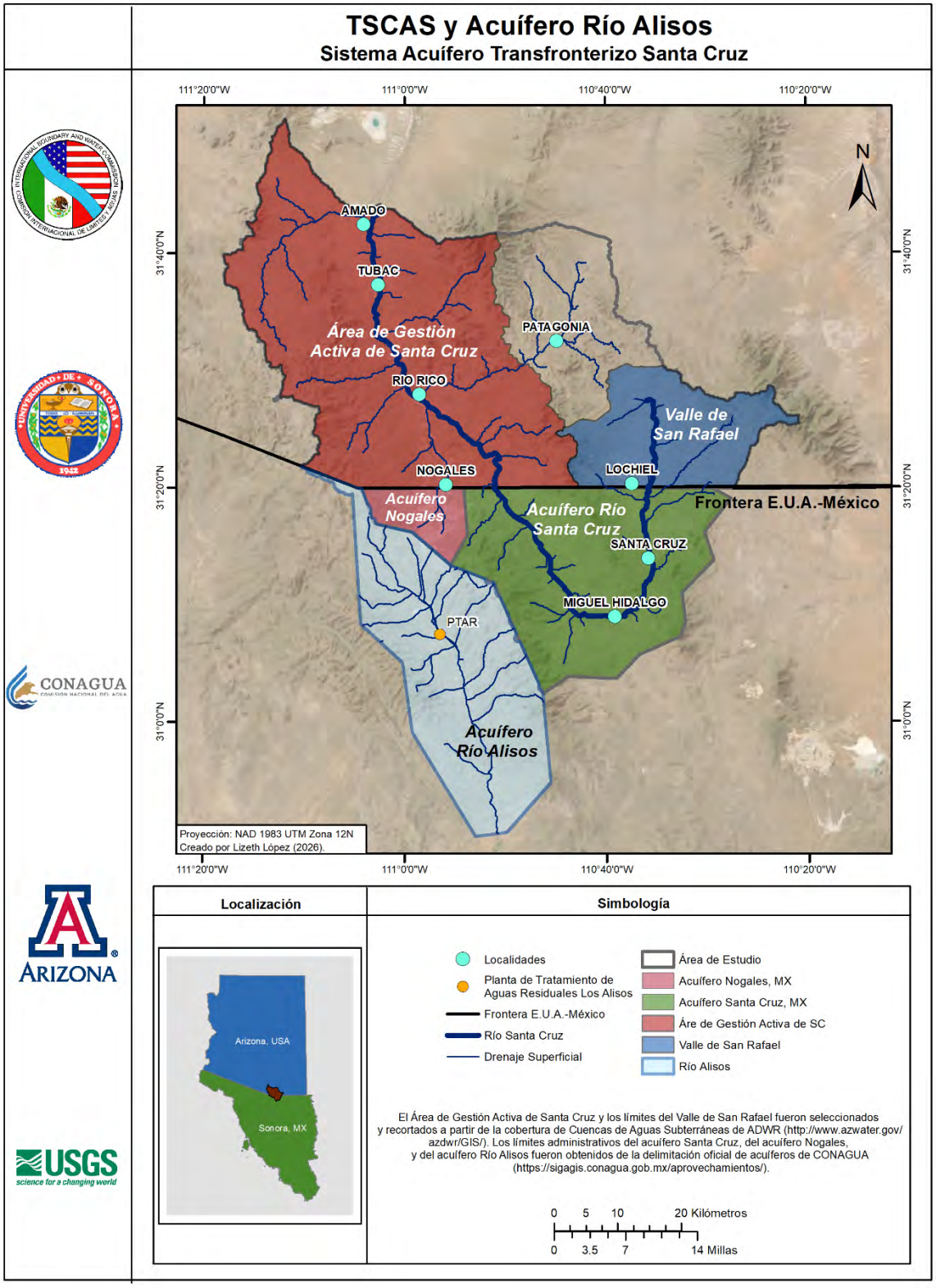


Figura 8.1 Configuración espacial del Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (TSCAS) y el acuífero adyacente del Río Alisos.

8.2. Trabajos anteriores

Aunque se han publicado estudios tanto para la parte sonorense como para la porción de Arizona del TSCAS (Figura 8.1), hasta ahora no se han realizado estudios de modelación numérica totalmente binacionales. En esta sección, se proporciona una breve lista de los modelos que se han desarrollado. En las siguientes secciones, se presentan descripciones más detalladas de los modelos seleccionados, incluyendo información sobre la geometría, la cobertura y los resultados.

8.2.1. Modelos de Flujo de Agua Subterránea en Arizona (ADWR)

El Departamento de Recursos Hídricos de Arizona (ADWR) ha desarrollado tres modelos regionales de flujo de aguas subterráneas para informar sobre la gestión de los recursos hídricos regionales en el Área de Manejo Activa de Santa Cruz (SCAMA). El Informe de Modelación No. 15 del ADWR abordó la zona entre la frontera entre Estados Unidos y México y la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales (PITAR) y subrayó la importancia de la recarga y descarga estacional de las aguas subterráneas en lo que se denominó “microcuencas” (Figura 8.2) (Erwin, 2007). Las microcuencas se describieron como acuíferos asociados a ríos de alta permeabilidad y extensión limitada, que suelen sufrir grandes cambios estacionales en los niveles y el almacenamiento de las aguas subterráneas. El Informe de Modelación No. 14 de la ADWR abarcaba la parte del Río Santa Cruz dominado por las aguas residuales entre la PITAR y el límite norte cerca de Amado, Arizona (Figura 8.2) (Nelson, 2007). Ambos modelos simularon las cargas hidráulicas, los caudales y los balances hídricos para condiciones transitorias basándose en un periodo de calibración de 1997 a 2002. Posteriormente, Hart (2019) documentó actualizaciones al modelo de flujo de agua subterránea del North Santa Cruz AMA. Además de estos trabajos, ADWR desarrolló un modelo de flujo de aguas subterráneas para toda la SCAMA (ADWR, 2020). El modelo amplió los dos modelos anteriores (Erwin, 2007; Nelson, 2007) incorporando la subcuenca de Nogales, así como actualizando los modelos con datos adicionales. La Figura 8.2 muestra las diferentes regiones de modelación descritas en este capítulo.

8.2.2. Modelos de Flujo de Agua Subterránea en Sonora (México)

Los estudios realizados en la porción mexicana del TSCAS se han centrado principalmente en el acuífero Río Santa Cruz en Sonora (SCRAS) y en el Acuífero Nogales en Sonora (NAS) (Figura 8.2). Estos esfuerzos incluyen investigación académica, estudios técnicos y evaluaciones oficiales de disponibilidad de agua subterránea realizadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Un primer esfuerzo de modelación numérica corresponde al modelo de flujo de agua subterránea en estado estacionario desarrollado por Tapia Padilla (2005) como tesis de maestría en la Universidad de Sonora. Este estudio se enfocó en la porción occidental del SCRAS y proporcionó una conceptualización fundamental del flujo regional de agua subterránea y de los flujos transfronterizos bajo condiciones de estado estacionario.

Posteriormente, el estudio de Minjarez et al. (2011), realizado por CILA, CONAGUA y la Universidad de Sonora, amplió el entendimiento hidrogeológico del lado mexicano del sistema acuífero mediante la compilación y el análisis de información hidrológica, hidrogeológica y de uso del agua.

De manera paralela, CONAGUA ha publicado estudios de disponibilidad de agua subterránea para el SCRAS y el NAS (CONAGUA, 2009, 2015, 2018 y 2024), conforme a lo establecido en la Ley de Aguas Nacionales y su reglamentación. Estas evaluaciones siguen la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, la cual define la disponibilidad de agua subterránea mediante un enfoque de balance hídrico:

$$\mathrm{DMA} = R - DNC - VEAS$$

donde la recarga total (R), la descarga natural comprometida (DNC) y los volúmenes de extracción de agua subterránea (VEAS) se estiman de manera anual. Aunque estos estudios no corresponden a modelos numéricos de flujo, proporcionan un marco para cuantificar la recarga, la descarga y el bombeo, y ofrecen información valiosa sobre las tendencias de sostenibilidad del agua subterránea en un contexto binacional.

En conjunto, los estudios de Tapia Padilla (2005), Minjarez et al. (2011) y CONAGUA constituyen la base principal para la comprensión de las condiciones de flujo de agua subterránea en la porción sonorense del TSCAS y proporcionan el fundamento conceptual para los análisis de balance hídrico en condiciones posteriores al desarrollo que se describen en las secciones siguientes.

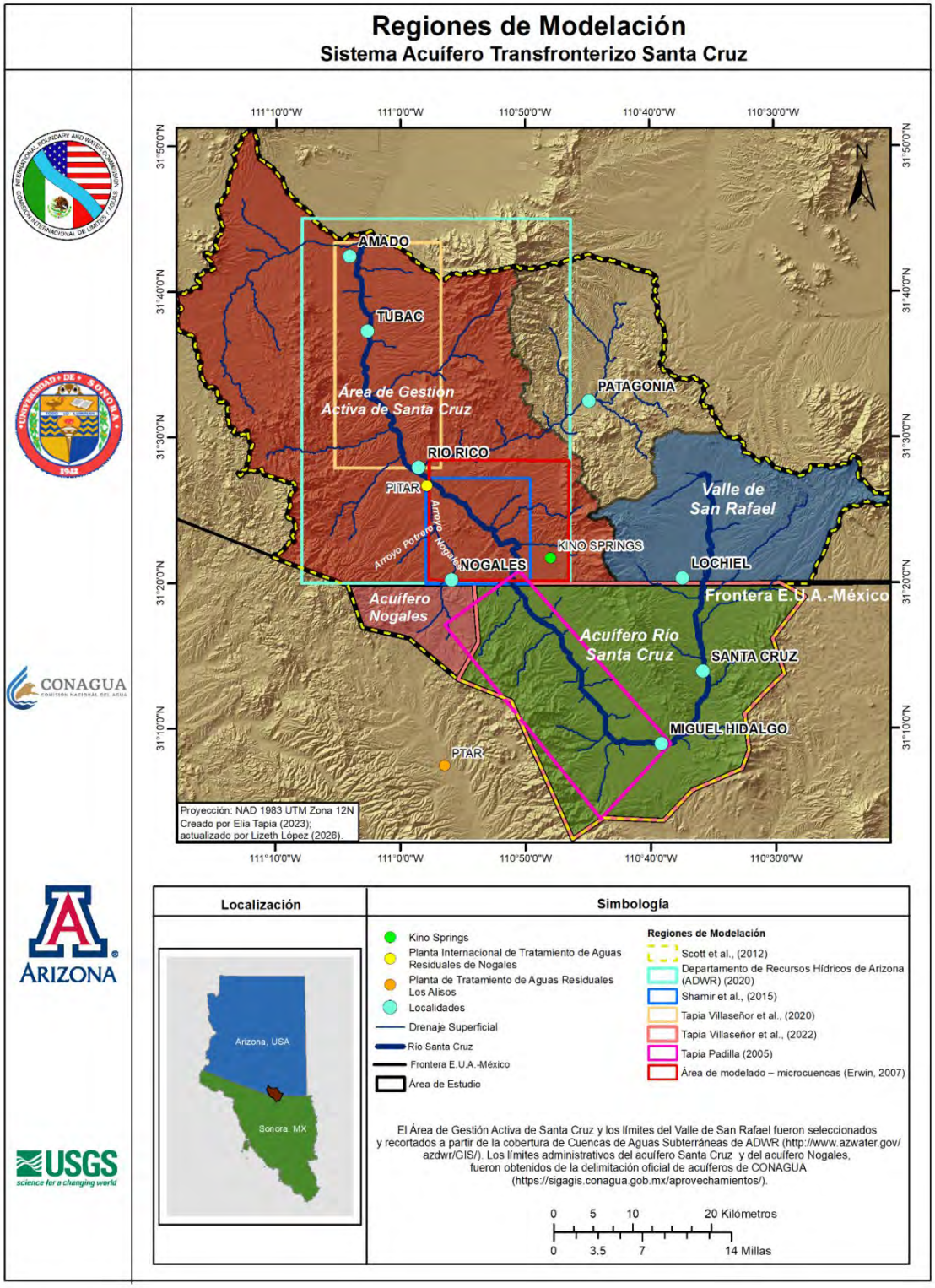


Figura 8.2 Regiones modeladas dentro del Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (TSCAS).

8.3. Comportamiento Hidrodinámico Antes y Después del Desarrollo

Las siguientes secciones describen los resultados de los modelos con respecto al comportamiento antes y después del desarrollo de la parte de Arizona del TSCAS. Además, se presentan los resultados de los modelos de aguas subterráneas para la parte mexicana del TSCAS.

8.3.1. Antes del Desarrollo

Un modelo conceptual o numérico previo al desarrollo suele consistir en una estimación de las entradas y salidas de agua subterránea cuando el sistema de aguas subterráneas se encontraba en un estado cuasi estacionario, antes de los efectos del cambio climático y del desarrollo agrícola, municipal e industrial. Sin embargo, en el TSCAS, debido a la falta de datos históricos adecuados, es difícil conocer con certeza el comportamiento hidrodinámico previo al desarrollo.

Se desarrollaron modelos conceptuales y numéricos para evaluar el balance hídrico previo al desarrollo de la parte dominada por los efluentes del Área de Manejo Activa de Santa Cruz (SCAMA), concretamente el segmento entre la PITAR y Amado, Arizona. Estos modelos se utilizaron para estimar las condiciones de estado estacionario aproximadamente en 1880 (Figura 8.3) (Nelson, 2007). Los componentes del flujo simulado antes del desarrollo incluyeron: flujo de entrada de agua subterránea cerca de la PITAR, estimada en 8 hm^3/año; recarga de frente de montaña de 4 hm^3/año; recarga de afluentes de 9 hm^3/año; y una recarga neta a lo largo del río entre Tubac y Amado de 14 hm^3/año (Tabla 8.1). La descarga de agua subterránea cerca de Amado hacia el Área de Manejo Activa de Tucson (AMA) se estimó en 28 hm^3/año, y la descarga neta a lo largo del río entre la PITAR y Tubac fue de aproximadamente 8 hm^3/año. De acuerdo con la definición del período previo al desarrollo, no se incluyó ningún bombeo en la simulación. Las diferencias entre el modelo conceptual y las estimaciones de caudal simuladas fueron mínimas, permaneciendo en general por debajo del 15%, con la excepción de la entrada de agua subterránea procedente de la zona de las microcuencas y los componentes de recarga de los afluentes y el frente de montaña. Las incertidumbres fueron significativas, atribuidas principalmente a la escasez de datos, y las incertidumbres calculadas más altas se asociaron con las estimaciones de recarga y entrada subterránea. Para obtener una descripción completa de las ecuaciones de modelación, los supuestos y las características clave, consulte Nelson (2007).

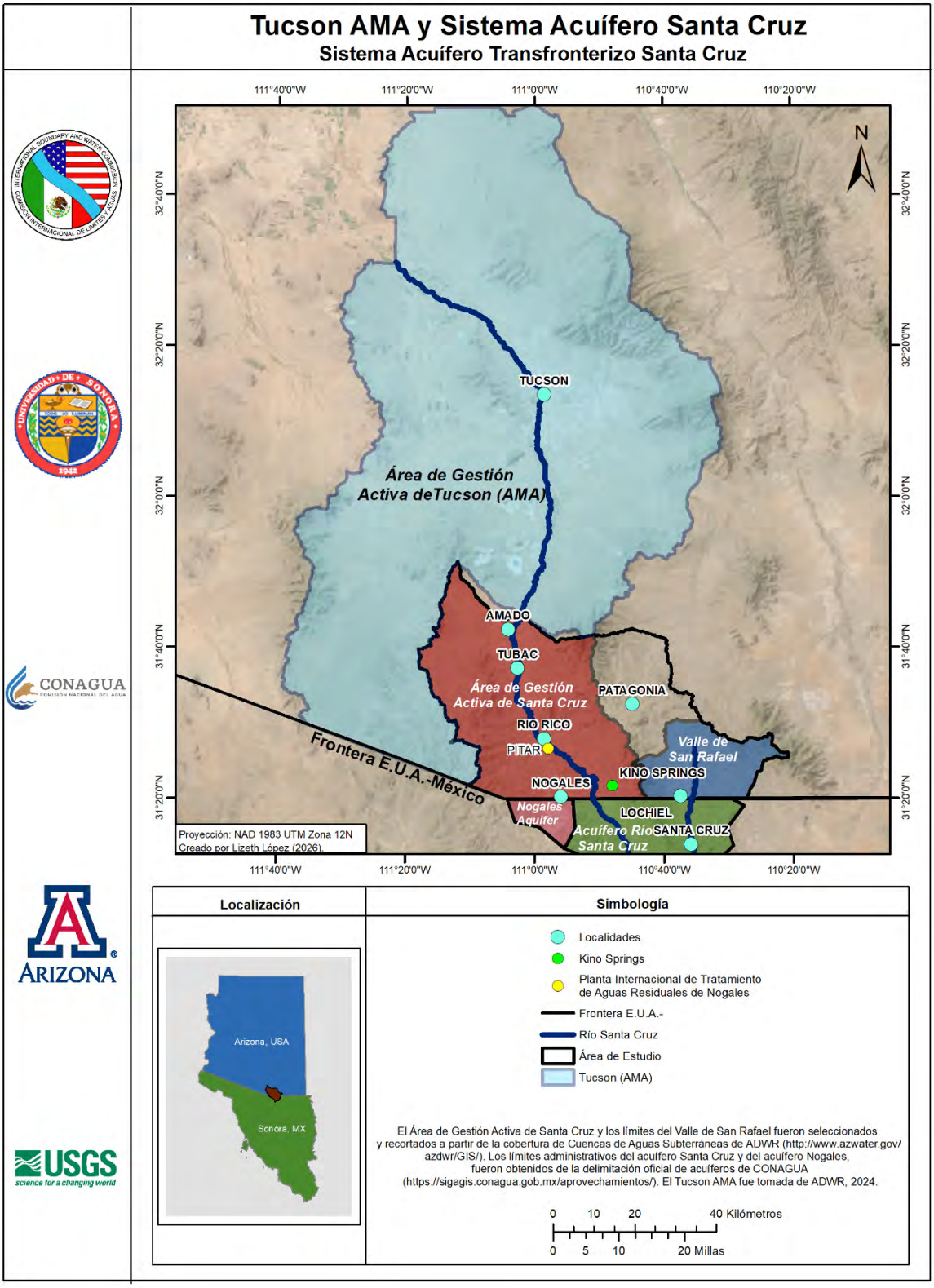


Figura 8.3 Mapa que muestra la ubicación del Área de Manejo Activa (AMA) de Tucson en relación con el Sistema Acuífero Santa Cruz

Tabla 8.1 Comparación de los balances hídricos anuales derivados de modelos conceptuales y simulados en estado estacionario, para el área entre la Planta Internacional de Tratamiento de Aguas Residuales de Nogales (PITAR) y Amado, Arizona, para el período anterior al desarrollo y para el período 1997-2002 (modificado a partir de Nelson, 2007). Todos los valores están expresados en hectómetros cúbicos por año (hm3 /año).

ENTRADA	CONCEPTUAL (1997-2002) (hm^3 /año)	SIMULADO (1997-2002) (hm^3 /año)	CONCEPTUAL Previo al desarrollo (hm^3 /año)	SIMULADO Previo aldesarrollo (hm^3 /año)
Afluencia de agua subterránea	12.3	11.5	6	8
Recarga de frente de montaña	6.17	2.34	6	4
Recarga de afluentes	8.14	10.3	8	9
Flujos de retorno de riego	2.10	1.89	0	0
Recarga neta a lo largo del Río Santa Cruz desde Tubac hasta Amado	17	17.6	14	14
Total	45.8	43.6	35	36
SALIDA	CONCEPTUAL (1997-2002)	SIMULADO (1997-2002)	CONCEPTUAL Previo al desarrollo	SIMULADO Previo al desarrollo
Flujo de agua subterránea	27.1	26.2	28	28
Bombeo de pozos	13.3	13.3	0	0
Descarga neta a lo largo del Río Santa Cruz desde la PITAR hasta Tubac	5.30	4.07	7	8
Caudales totales	45.8	43.6	35	36

8.3.2. Después del Desarrollo

El balance hídrico posterior al desarrollo incluye impactos antropogénicos como la recarga artificial, los cambios en la evapotranspiración (solo de la zona saturada) y el bombeo. La recarga artificial proviene de diferentes fuentes, como el excedente de agua de riego y las aguas residuales de las ciudades y los sistemas sépticos. Los modelos conceptuales de comportamiento hidrodinámico posterior al desarrollo en el Acuífero de Nogales en Sonora (NAS) y el Acuífero Río Santa Cruz en Sonora (SCRAS) (Figura 8.2) fueron actualizados por CONAGUA (2024a; 2024b), pero no hay modelos publicados centrados en el NAS o el SCRAS con simulaciones transitorias para estimar la variación estacional de los caudales que afectan al acuífero. El informe de disponibilidad de agua subterránea de la CONAGUA (2024b) sobre el NAS estimó que la

evapotranspiración era de 0.6 hm^3/año, junto con una tasa de bombeo total de 0.8 hm^3/año (Tabla 8.2). Se utilizó la ley de Darcy para calcular el flujo de agua subterránea hacia los Estados Unidos, que se estimó en aproximadamente 3.4 hm^3/año. El cambio medio anual en el almacenamiento entre 1994 y 2005 se calculó en 0.4 hm^3/año. Utilizando estos valores para los componentes del balance hídrico, se calculó una tasa de recarga de 5.2 hm^3/año. El informe de la CONAGUA (2024a) sobre la disponibilidad de agua subterránea en el SCRAS estimó que la evapotranspiración era de 8.8 hm^3/año y que la tasa de bombeo total era de 26.4 hm^3/año (Tabla 8.2). Se utilizó la ley de Darcy para calcular los flujos de agua subterránea, estimándose unas salidas hacia los Estados Unidos de aproximadamente 2.0 hm^3/año y unas entradas de 10.2 hm^3/año a través de la recarga del frente de montaña y de bloque de montaña. La recarga inducida por los flujos de retorno agrícolas se estimó en 4.1 hm^3/año. El cambio medio anual en el almacenamiento entre 1994 y 2005 se calculó en 0.9 hm^3/año. Con estos valores para los componentes del balance hídrico, se calculó una tasa de recarga vertical de 23.8 hm^3/año (Tabla 8.2). La recarga vertical incluye la recarga de todas las fuentes, excepto los flujos de retorno agrícolas, el frente de montaña y la recarga de bloque de montaña. Para información más detallada sobre la evaluación de la disponibilidad de agua en México, consulte la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, *Conservación de los Recursos Hídricos*, que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

Tabla 8.2 Componentes del modelo de balance hídrico del Acuífero Nogales en Sonora (NAS) y del Acuífero Río Santa Cruz en Sonora (SCRAS) de la CONAGUA para el año 2024 (CONAGUA, 2024a y CONAGUA, 2024b).

Componentes de entrada y salida		**NAS (**hm^3/año)	**SCRAS (**hm^3/año)
Entradas	Entradas de agua subterránea		10.2
	Retorno agrícola		4.1
	Recarga vertical	5.2	23.8
Salidas	Bombeo de agua subterránea	0.8	26.4
	Salidas de agua subterránea	3.4	2
	Evapotranspiración	0.6	8.8
	Variación en el almacenamiento	0.4	0.9

Tapia Padilla (2005) desarrolló un modelo de estado estacionario de la parte occidental del SCRAS (Figura 8.2). La cuadrícula rectangular del modelo se giró unos 24° al oeste del norte para adaptarse a la orientación del río. En este modelo solo se utilizó una capa que representaba una unidad compuesta por aluviones y conglomerados, los principales componentes del acuífero en la zona de estudio. Las condiciones de frontera incluyeron el caudal estimado en el Río Santa Cruz, la recarga vertical y la evapotranspiración, así como las fronteras de carga constante en los extremos aguas arriba (Miguel

Hidalgo) y aguas abajo (frontera entre Estados Unidos y México) del modelo. Las condiciones iniciales (valores piezométricos) para la simulación en estado estacionario fueron las medidas en el año 1989 y se tomaron de Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. (1989). La simulación generó un caudal de salida hacia los Estados Unidos de 1.54 hm^3/año (en comparación con la estimación de Erwin (2007) de 1.66 hm^3/año). Se podría utilizar información adicional, como la procedente de pruebas de acuíferos, para mejorar el modelo.

Erwin (2007) desarrolló un modelo de flujo de agua subterránea para la parte del acuífero a lo largo del Río Santa Cruz, entre la frontera entre Estados Unidos y México y la PITAR (Figura 8.2). Utilizaron balances hídricos estacionales de los años 1998 a 2002 para calibrar el modelo (Tabla 8.3). Los periodos de estrés oscilaron entre uno y 273 días. Hubo algunas diferencias sustanciales entre los flujos simulados y los del modelo conceptual. La evapotranspiración conceptual fue un 40% superior a la simulada, posiblemente debido a la diferencia en los intervalos de tiempo (diarios para el modelo conceptual, mensuales para el modelo numérico) o a la hipótesis del modelo de que toda el agua para la transpiración se deriva de la zona saturada. Está bien establecido que algunas especies de árboles presentes en esta zona utilizan el agua del suelo cercana a la superficie tras los episodios de precipitación. Se elaboraron estimaciones del balance hídrico anual para los años hidrológicos 1998 a 2002 (por ejemplo, el año hidrológico 1998 sería del 1 de octubre de 1997 al 30 de septiembre de 1998) (Tabla 8.3). Los valores se presentan como medianas del modelo conceptual o como mediana o media de las simulaciones. Las diferencias entre la mediana y la media pueden indicar un cierto sesgo de los valores medios hacia los valores atípicos. Las estimaciones de la entrada de agua subterránea (canal principal) desde Sonora hacia la zona de las microcuencas (Figura 8.2) oscilaron entre 0.4 y 0.7 hm^3/año (Tabla 8.3). La recarga en el canal del Río Santa Cruz varió entre 4.6 y 10.6 hm^3/año, y la recarga del frente de montaña entre 1.5 y 1.7 hm^3/año. La descarga en la zona ribereña (evapotranspiración) varió entre 2.3 y 4.5 hm^3/año y el bombeo entre 3.5 y 3.8 hm^3/año. Las salidas de agua subterránea hacia la AMA de Tucson oscilaron entre 0.7 y 1.2 hm^3/año. Los valores conceptuales del agua superficial se utilizaron como entradas del modelo, mientras que el agua superficial que sale del sistema no se conceptualizó, sino que se estimó a partir del modelo (Tabla 8.3).

Tabla 8.3 Comparación de los balances hídricos anuales de los modelos conceptuales y numéricos en estado estacionario para el área de las microcuencas, basados en los años hidrológicos 1998-2002 (Erwin, 2007). Todos los valores están expresados en hectómetros cúbicos por año.

	Conceptual (mediana) (hm^3 /año)	Simulado (mediana) (hm^3 /año)	Simulado (media) (hm^3 /año)
AGUAS SUBTERRÁNEAS ENTRADAS			
Recarga			
Canal principal	7.1-10.6	5.6	4.6
Frente de montaña	1.7	1.5	1.5
Afluencia de aguas subterráneas			
Canal principal	0.5-0.7	0.4	0.5
Entrada total de agua subterránea	7.3-10.2	7.4	6.5
AGUA SUBTERRÁNEA SALIDAS			
Evapotranspiración ribereña	4.5	2.4	2,3
Bombeo de agua subterránea			
Municipal	3.3		
Agricultura	0.37		
Otros	0.15		
Bombeo total de aguas subterráneas	3.8	3.5	3.6
Salida de agua subterránea			
Canal principal	0.7-1	1.2	1.1
Salida total de agua subterránea	9.1-9.6	7.2	7.6
Variación en el almacenamiento		1.5	0.4

Todos los valores están en hectómetros cúbicos por año.

Para la parte del SCAMA dominada por los efluentes, además del balance hídrico previo al desarrollo mencionado anteriormente, Nelson (2007) desarrolló modelos numéricos conceptuales y calibrados para comprender el comportamiento estable y transitorio posterior al desarrollo. Se desarrollaron modelos conceptuales alternativos y se clasificaron según los parámetros estimados y observados y según las cargas hidráulicas y los caudales resultantes. Aunque la mayoría de los modelos alternativos eran similares al modelo final en términos de recarga, geología y condiciones de frontera, varios se desviaban en cuanto a la distribución espacial de la conductividad hidráulica. Debido a la gran incertidumbre asociada al modelo previo al desarrollo, se desarrolló un balance hídrico en estado cuasi estacionario para los caudales invernales durante el periodo 1997-2002, con el fin de aprovechar el equilibrio estacional invernal y la disponibilidad de datos de alta calidad. También se desarrollaron simulaciones para condiciones estacionarias y transitorias para el período 1949-1959

(antes de la influencia de la descarga de aguas residuales de la PITAR). La estimación calibrada final (1997-2002) de la entrada de agua subterránea desde el área de las microcuencas (Figura 8.2) fue de 11.5 hm^3/año (Tabla 8.1). La recarga en el cauce del Río Santa Cruz fue de 17.6 hm^3/año, y la recarga en el frente de montaña fue de 2.34 hm^3/año. La descarga en la zona ribereña (evapotranspiración) fue de 16.0 hm^3/año, y el bombeo fue de 13.3 hm^3/año. La descarga hacia la AMA de Tucson se estimó en 26.2 hm^3/año. Durante el periodo 1949-1959, varios caudales (registrados como entradas y salidas acumuladas) fueron sustancialmente mayores que los del periodo 1997-2002. Este fue especialmente el caso de la recarga procedente del caudal de retorno de la agricultura, que durante el periodo 1949-1959 fue aproximadamente dos veces mayor que el caudal de retorno en el periodo de modelación 1997-2002. Durante 1949-1959, tanto el flujo de agua subterránea procedente de Sonora como el bombeo fueron mayores que durante el periodo 1997-2002. La disminución del bombeo a lo largo del tiempo está relacionada principalmente con la disminución de las tierras agrícolas en la zona después de 1980.

8.3.3. Modelo Actualizado del Área de Manejo Activa de Santa Cruz

En 2020, ADWR (ADWR, 2020) publicó un modelo regional de flujo de agua subterránea de la SCAMA que utilizaba MODFLOW. Entre los objetivos se incluía combinar y actualizar los modelos publicados anteriormente por ADWR y ampliar el dominio del modelo a la subcuenca de Nogales. El modelo transitorio se calibró según las condiciones del acuífero en la SCAMA entre el 1 de octubre de 1997 y el 31 de diciembre de 2018. A diferencia de los modelos anteriores (Erwin, 2007; Nelson, 2007), que se calibraron durante el periodo 1997-2002, el modelo de ADWR (2020) amplió el periodo de calibración a 16 años, lo que le permitió captar una gama más amplia de variabilidad climática y de las condiciones de gestión del agua subterránea. Para simular este comportamiento, se condicionaron las cargas iniciales para representar el equilibrio dinámico que el sistema alcanza en el transcurso de unos pocos años (Maddock y Vionnet, 1998). Este es el mismo enfoque utilizado en Nelson (2007). Para calibrar el modelo se utilizó un gran número de observaciones de niveles de agua subterránea (6,115), caudales de ríos (1,237) y objetivos de calibración de información previa (17). Se desarrolló con éxito un modelo transitorio debido a que los niveles y los flujos de agua variaron sustancialmente a escala estacional y anual. Una de las consecuencias de disponer únicamente de un modelo transitorio es que los valores de los parámetros son menos sensibles y, por lo tanto, presentan mayor incertidumbre. Además, la incertidumbre relacionada con las propiedades físicas, la entrada y salida del acuífero y el modelo de recarga llevó a probar numerosos modelos conceptuales alternativos. El modelo final seleccionado era el que presentaba menor incertidumbre y error de observación. En el modelo, los cambios estacionales en el bombeo, la evapotranspiración ribereña y la recarga de los arroyos se introdujeron en intervalos mensuales.

En general, el modelo fue capaz de reproducir las interacciones entre los arroyos y los acuíferos a lo largo del arroyo Nogales, así como los cambios

estacionales e interanuales en la descarga y la recarga a lo largo del Río Santa Cruz (Figura 8.2). También reprodujo el aumento de la recarga aguas abajo de la PITAR causado por la mejora de la planta de tratamiento y la consiguiente reducción de la obstrucción biológica. Los resultados sugieren que la recarga inducida por la escorrentía a lo largo del Río Santa Cruz favorece la sostenibilidad a largo plazo de los niveles de agua subterránea. Además, el flujo de agua subterránea se ve afectado tanto por la distribución de los sedimentos como por las fallas que controlan la conductividad hidráulica y la dirección del flujo; el control del flujo por las fallas es sustancial tanto a escala local como regional. Aunque el acuífero regional no está confinado, existen capas confinantes en Kino Springs y cerca de la confluencia de los arroyos Potrero y Nogales (Figura 8.2). Las capas confinantes afectan localmente a los niveles de agua subterránea, pero no afectan al sistema regional de aguas subterráneas.

8.3.4. Otros Modelos de Balance Hídrico (WBM)

Se han realizado algunos modelos sobre los efectos del clima en las aguas subterráneas. (Scott et al. 2012). Se analizo el impacto del cambio climático y el crecimiento demográfico en el TSCAS. El estudio incorporó las incertidumbres climáticas y los factores que determinan la demanda humana en un modelo de balance hídrico (WBM). Se utilizó un modelo de circulación global (GCM), considerado el más adecuado para predecir los patrones de precipitación regionales, junto con varios escenarios de emisiones de carbono, para estimar que la recarga representaba el 15 % de las precipitaciones. La demanda urbana de agua se incrementó en proporción a las previsiones de crecimiento demográfico. Los resultados sugirieron que, con el tiempo, la demanda acabaría siendo superior a la oferta y que esta última requeriría un aporte complementario procedente de fuentes externas. Los autores concluyeron que, si México retuviera la parte de las aguas residuales que actualmente envía a la PTAR del NI, el caudal de los arroyos, el almacenamiento en los acuíferos y el hábitat ribereño probablemente se verían afectados de manera sustancial.

Los impactos del cambio climático también se abordaron en el marco de modelización para la planificación de los recursos hídricos en el tramo de las «microcuencas» del río Santa Cruz desarrollado por Shamir et al. (2005), Shamir et al. (2007) y Shamir et al. (2015) (Figura 8.2). El marco de modelización consistía en generadores estocásticos de precipitación y caudal por hora, un modelo simplificado de precipitación-escorrentía para producir el caudal por hora, y el trazado del caudal con pérdidas de transmisión en el cauce y recarga de aguas subterráneas. Uno de los objetivos de Shamir et al. (2005) era explorar la frecuencia de bombeo que provocaría una disminución del almacenamiento en los acuíferos por debajo de determinados umbrales. Descubrieron que las microcuencas individuales varían en su sensibilidad al bombeo. Además, observaron que las proyecciones de caudal basadas en registros históricos de precipitación (67 años) se subestimaban en comparación con las proyecciones de caudal que utilizaban tanto registros históricos como información paleoclimática.

Este modelo se actualizó en Shamir et al. (2015). Las proyecciones del cambio climático se generaron utilizando ocho modelos climáticos globales (MCG) reducidos dinámicamente. El módulo de aguas subterráneas se modificó para permitir simulaciones por horas, y la profundidad hasta el nivel freático se estimó como una función lineal del almacenamiento de aguas subterráneas. El modelo se utilizó para evaluar los efectos del cambio climático y de distintos escenarios de gestión. Se predijo que los efectos del cambio climático reducirían la fiabilidad del suministro de agua y la recarga de los cauces, y aumentarían la escasez de agua a largo plazo y los períodos en los que la profundidad hasta el nivel freático se situara por debajo de los umbrales que representan los niveles de riesgo de mortalidad de la vegetación ribereña.

Los esfuerzos del TAAP en la frontera entre Arizona y Sonora han incluido el desarrollo de Modelos de Balance Hídrico (WBM) para el TSCAS, en particular para la zona situada aguas abajo de la PITAR (Tapia-Villaseñor et al., 2020), el SCRAS (Tapia-Villaseñor et al., 2022) y una iniciativa prevista en el NAS. Tapia-Villaseñor et al. (2020) consideraron el efecto de las incertidumbres climáticas y las decisiones de gestión del agua de Estados Unidos y México en su WBM. Aunque el estudio se centró en la zona situada aguas abajo de la PITAR, proporcionó información sobre la influencia de los posibles cambios en las descargas de efluentes binacionales al Río Santa Cruz (Figura 8.2).

Los datos introducidos en el WBM incluyeron la recarga del frente de montaña de (6.17 hm^3/año), la recarga de los tributarios (9.22 hm^3/año), el caudal natural del Río Santa Cruz (una media de 33.57 hm^3/año para los años 1945-2017), el retorno agrícola incidental (3.65 hm^3/año), las entradas de agua subterránea (9.25 hm^3/año) y ocho escenarios de descarga de efluentes de la PITAR (que oscilan entre 5.42 y 24.6 hm^3/año). Los escenarios de descarga de efluentes se basaron en los registros de la Comisión Internacional de Límites y Aguas de 1996 a 2018 y en entrevistas con las principales partes interesadas (Tapia-Villaseñor et al., 2020). Los escenarios de descarga de efluentes consideraron las descargas medias, máximas y mínimas antes y después de la construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Los Alisos en México en 2012. Las salidas del sistema incluyeron la evapotranspiración (que osciló entre 16.05 y 20.97 hm^3/año para las estaciones secas y húmedas), el bombeo de agua subterránea (que osciló entre 19.49 y 28.37 hm^3/año), la salida subterránea (27.14 hm^3/año) y las salidas superficiales (10.98 hm^3/año). Según este estudio, los caudales naturales del Río Santa Cruz y la descarga de efluentes de la PITAR representan el 65 % de las entradas al sistema, mientras que el bombeo de agua subterránea representa alrededor del 24 % de la salida. Estos tres componentes, relacionados con las incertidumbres climáticas y las decisiones de gestión del agua y las aguas residuales en los Estados Unidos y México, indican que los esfuerzos de monitoreo, la comunicación y la colaboración pueden apoyar a los gestores en el tratamiento y el uso de los efluentes binacionales del TSCAS.

En Tapia-Villaseñor et al. (2022), el WBM se centra en evaluar la cantidad de extracción anual de agua subterránea que mantendría las condiciones

sostenibles a largo plazo para el SCRAS. Los autores consideraron la definición de rendimiento seguro del ADWR para describir el objetivo de gestión de lograr un equilibrio entre la extracción de agua subterránea y la recarga de agua subterránea. Este objetivo se utiliza a menudo para describir las condiciones sostenibles. Además, las extracciones sostenibles de agua subterránea, según Alley et al. (1999) y Alley y Leake (2004), se definen como "la cantidad de agua que se puede extraer del acuífero sin causar consecuencias indeseables para el medio ambiente, la economía y la sociedad". Las entradas y salidas del modelo se basaron en estudios de disponibilidad de agua para la región (CONAGUA 2009, 2015 y 2018), y se utilizó un modelo hidrológico para simular las entradas y salidas en función de las precipitaciones. El modelo hidrológico utilizado es el modelo Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) (Burnash et al., 1973), configurado para la región por el Centro de Pronóstico Hidrológico de la Cuenca del Río Colorado (CBRFC). El WBM se resolvió para obtener los flujos promedio de entrada y salida que mantienen condiciones sostenibles, incluida una tasa media de bombeo de agua subterránea de 23.26 hm^3/año. Esta cantidad se determinó utilizando datos de recarga dependientes del clima de 1954 a 2020, y representa la cantidad de extracción de agua subterránea (Pu) que da lugar a cambio en el almacenamiento medio anual (ΔS) de cero. Para obtener más detalles sobre este método, véase Tapia-Villaseñor et al. (2022).

8.4. Conclusiones

El sistema de flujo de aguas subterráneas en el TSCAS ha sido estudiado por investigadores tanto de Estados Unidos como de México, junto con miembros de diferentes organismos gubernamentales. La complejidad de los estudios ha variado a lo largo de las décadas, al igual que el área de interés. Actualmente (2026), la mayoría de los estudios se refieren a un subconjunto político-administrativo específico del TSCAS y no al conjunto binacional (véase el Capítulo 1 para obtener más información sobre los subconjuntos político-administrativos). En este capítulo se ha presentado un resumen de los modelos conceptuales y numéricos disponibles para la región (Tabla 8.2 y Tabla 8.3). Aunque existe una evidente falta de modelos binacionales de flujo de aguas subterráneas, hay un sólido conjunto de conocimientos sobre la región de estudio que podría servir de base para futuros esfuerzos de modelación binacional. Un modelo binacional de aguas subterráneas podría mejorar las estimaciones de los flujos transfronterizos y permitir una mejor comprensión de los impactos climáticos, lo que ayudaría a desarrollar escenarios modelo para simular los efectos de los cambios en las prácticas de gestión, el uso del suelo y los usos industriales. Existen disparidades entre los métodos utilizados para procesar y analizar los datos a cada lado de la frontera, lo que dificulta la comparación y la conciliación de los componentes de entrada y salida de los modelos de balance hídrico disponibles. Algunas iniciativas potenciales de investigación y monitoreo que podrían mejorar el desarrollo y el refinamiento de un modelo binacional incluyen:

1. El monitoreo de los niveles de agua subterránea en todos los subconjuntos político-administrativos del TSCAS podría implementarse al

menos una vez cada cinco años, con especial atención a las regiones poco estudiadas.

2. Las pruebas adicionales de bombeo de aguas subterráneas podrían mejorar la información relativa a diferentes parámetros hidrogeológicos.

3. La instalación de un medidor de caudal en México podría ayudar a calibrar la información sobre las aguas superficiales.

4. La instalación de un medidor de caudal en el arroyo Potrero podría mejorar la comprensión de los efectos de la recarga en el gradiente descendente.

5. La instalación de estaciones meteorológicas en lugares que carecen de información climática histórica podría contribuir a refinar los datos sobre precipitaciones y evapotranspiración.

6. La armonización de los componentes de entrada y salida de los modelos disponibles de flujo de agua subterránea podría ayudar a realizar una modelación más completa de toda la zona de estudio.

Los esfuerzos de modelación del balance hídrico, tanto histórico como actual, dentro del Sistema Acuífero Transfronterizo Santa Cruz (TSCAS) constituyen un paso fundamental para mejorar la comprensión de la recarga y el almacenamiento del Acuífero Río Santa Cruz en Sonora (SCRAS). Esta información, junto con los esfuerzos de modelación anteriores para la zona de las microcuencas (la zona situada entre la frontera entre Estados Unidos y México y la PITAR al norte), garantiza la cobertura de datos en todas las subregiones que componen el TSCAS. Además, los componentes (entradas y salidas) de cada uno de estos WBM son valiosos para desarrollar futuros modelos de aguas subterráneas para la región transfronteriza.

Bibliografía

Alley, W., Reilly, T.E., Franke, O.L., 1999. Sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos. Circular 1186 del Servicio Geológico de los Estados Unidos. (PDF) Sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos Consultado el 25 de julio de 2024 en https://pubs.usgs.gov/circ/circ1186/.

Alley, W.M. y Leake, S.A. 2004., El camino desde el rendimiento seguro hacia la sostenibilidad. Aguas subterráneas, 42: 12-16, https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2004.tb02446.x.

Arizona Department of Water Resources (ADWR), 2020. Modelo de flujo de aguas subterráneas del área de gestión activa de Santa Cruz a lo largo del Río Santa Cruz y Nogales Wash, desde la frontera internacional hasta Tubac, informe, consultado el 16 de abril de 2021 en FINAL_SCAMA_ModelReport_092020.pdf (azwater.gov)

Burnash, R.J.; Ferral, R.L.; McQuire, R.A., 1973. Un sistema generalizado de simulación del flujo de los arroyos en el modelado conceptual para computadoras digitales; Servicios Meteorológicos Nacionales de EE. UU.: Sacramento, California, EE. UU.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2009. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2615 Río Santa Cruz, estado de Sonora; Diario Oficial de la Federación (DOF): Ciudad de México, México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea en el acuífero Río Santa Cruz (2615) Río Santa Cruz, Estado de Sonora; Diario Oficial de la Federación (DOF): Ciudad de México, México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2024a, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2615) Río Santa Cruz, Estado de Sonora. 30 p. Consultado el 9 de agosto de 2021 en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2615.pdf

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2024b, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (2650) Nogales, Estado de Sonora. 25 p. Consultado el 9 de agosto de 2021 en: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/sonora/DR_2650.pdf

Earman, S., Campbell, A. R., Phillips, F. M. y Newman, B. D., 2006. Intercambio isotópico entre la nieve y el vapor de agua atmosférico: estimación del componente de deshielo de la recarga de aguas subterráneas en el suroeste de Estados Unidos. Journal of Geophysical Research, 111, D09302. https://doi.org/10.1029/2005JD006470

Eastoe, C. J. y Wright, W. E., 2019, Hidrología de los bloques montañosos de Arizona y Nuevo México según revelan los isótopos del agua subterránea y las precipitaciones. Geosciences 9, 461; doi:10.3390/geosciences9110461.

Erwin, G., 2007, Modelo de flujo de aguas subterráneas de las microcuencas del área de gestión activa de Santa Cruz, desde la frontera internacional hasta la planta internacional de tratamiento de aguas residuales de Nogales, condado de Santa Cruz, Arizona.

Flint, L.E. y Flint, A.L., 2007, Análisis regional de la recarga de aguas subterráneas, en Stonestrom, D.A., Constantz, J., Ferre, Ty P.A. y Leake, S.A., eds., Recarga de aguas subterráneas en el suroeste árido y semiárido de los Estados Unidos: Documento profesional 1703-B del Servicio Geológico de los Estados Unidos, págs. 29-60, consultado el 8 de abril de 2025 en https://pubs.usgs.gov/pp/pp1703/b/.

Hart. O. 2019. Updates to the Northern Santa Cruz AMA (NSCAMA) Groundwater Flow Model. Technical Memorandum. https://www.azwater.gov/sites/default/files/2022-12/NSCAMAmodelupdates_05082019.pdf

Maddock III., T., Vionnet, L., 1998, Procesos de captación de agua subterránea bajo una variación estacional en la recarga y descarga natural. Revista de Hidrogeología 6, 24-32, https://doi.org/10.1007/s100400050131

Markovich, K., Manning, A., Condon, L., McIntosh, J., 2019, Recarga de bloques montañosos: una revisión de los conocimientos actuales. Water Resources Research v. 55, doi:10.1029/2019WR025676

Minjarez Sosa, I., Monreal Saavedra, R., Rangel Medina, M., Grijalva Noriega, G., Ochoa Granillo, A., Tapia Villaseñor, E.M., Ramírez Díaz, L.L., Cirett Galán, S.E., Moncada García, G., Monijo González, A., Actividades hidrogeológicas en el acuífero Río Santa Cruz, estado de Sonora, primera etapa. Hermosillo, México: Universidad de Sonora, 2011. Consultado el 7 de abril de 2025 en https://docslib.org/doc/6055430/actividades-hidrogeol%C3%B3gicas-en-el-acu%C3%ADfero-r%C3%ADo-santa-cruz-estado-de-sonora-primera-etapa.

Nelson, K., 2007. Modelo de flujo de aguas subterráneas del área de gestión activa de Santa Cruz a lo largo del Río Santa Cruz, dominado por efluentes, condados de Santa Cruz y Pima, Arizona. Informe de modelización n.º 14, Departamento de Recursos Hídricos de Arizona, Phoenix, Arizona.

Scanlon, B. R., Keese, K. E., Flint, A. L., Flint, L. E., Gaye, B., Cheikh, W. M. E. y Simmers, I., 2006, Síntesis global de la recarga de aguas subterráneas en regiones semiáridas y áridas. Procesos hidrológicos, 20, 3335-3370. https://doi.org/10.1002/hyp.6335

Scott, C., Megdal, S., Oroz, L., Callegary, J. y Vandervoet, P., 2012, Efectos del cambio climático y el crecimiento demográfico en el acuífero transfronterizo de Santa Cruz, Climate Research, 51(2), 159-170. https://doi.org/10.3354/cr01061

Shamir, E., Georgakakos, K.P., Graham, N.E., Wang, J., 2005, Generación y análisis de modelos hidrológicos probables para uso operativo. Informe técnico del Centro de Investigación Hidrológica.

Shamir, E., S.B. Megdal, C. Carrillo, C.L. Castro, H.-I. Chang, K. Chief, F.E. Corkhill, S. Eden, K.P. Georgakakos, K.M. Nelson, J. Prietto, et al. 2015, Cambio climático y gestión de los recursos hídricos en la cuenca alta del Río Santa Cruz, Arizona, Journal of Hydrology 521: 18-33. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.062 (El cambio climático y la gestión de los recursos hídricos en el valle del Río Colorado).

Shamir, E.D., Meko, M., Graham, N.E., Georgakakos, K.P., 2007, Marco del modelo hidrológico para la planificación de los recursos hídricos en el Río Santa Cruz, sur de Arizona. Revista de la Asociación Estadounidense de Recursos Hídricos (JAWRA) 43(5):1155-1170.

Tapia Padilla, G., 2005, Aplicación de Modflow para la Simulación Hidrogeológica Estacionaria de una Porción de la Cuenca del Río Santa Cruz, Sonora, México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería, Área Ingeniería Ambiental, Universidad de Sonora.

Tapia-Villaseñor, E.M., Shamir, E., Cruz-Ayala, M., Megdal, S.B., 2022, Evaluación de la sostenibilidad de la extracción de agua subterránea en la parte mexicana del acuífero transfronterizo del Río Santa Cruz. Water 14 (2): 233. https://doi.org/10.3390/w14020233 (Evaluación de la sostenibilidad de la extracción de agua subterránea en la parte mexicana del acuífero

Tapia-Villaseñor, E.M., Shamir, E., Megdal, S.B., Petersen-Perlman, J.D., 2020, Impactos del clima variable y los flujos de efluentes en el acuífero transfronterizo de Santa Cruz. JAWRA Revista de la Asociación Estadounidense de Recursos Hídricos 56 (3): 409-30. https://doi.org/10.1111/1752-1688.12853 (Estudio de evaluación de la disponibilidad de agua y definición de explotación en el Valle del Río Santa Cruz con fines de

Técnicas Geológicas y Mineras, S.A., 1989. Estudio de evaluación de la disponibilidad de agua y definición de explotación en el Valle del Río Santa Cruz con fines de abastecimiento de agua a la ciudad de Nogales, Son. Comisión Nacional del Agua, Contrato: VI-89-313-D. 173 p.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Resumen y Observaciones Finales

El área de estudio se ubica dentro de la provincia fisiográfica de Sierras y Valles (Basin and Range), una región tectónicamente activa caracterizada por sierras separadas por valles paralelos. Dentro de este marco estructural, la cuenca del Río Santa Cruz funciona como un corredor hidrológico crítico que conecta las zonas de recarga en las montañas con el valle del Río Santa Cruz. El enfoque binacional adoptado para este estudio permitió la armonización de métodos y fuentes de datos, lo que resultó en una representación más completa del sistema acuífero en comparación con lo que podría lograrse de manera independiente en cada país. Este trabajo amplía la base de conocimiento sobre la geología, hidrología y dinámica del flujo subterráneo en el Sistema Acuífero Transfronterizo Río Santa Cruz (TSCAS, por sus siglas en inglés), y establece las bases necesarias para análisis científicos continuos sobre acuíferos transfronterizos.

9.2. Resumen de Hallazgos

9.2.1. Marco Geológico y Estructural

El TSCAS ocupa una cuenca estructuralmente compleja dentro de la Provincia Basin and Range, donde sierras alternadas y valles limitados por fallas se formaron a través de procesos de extensión cenozoica. Rocas del basamento Precámbrico, cubiertas por sucesiones sedimentarias y volcánicas paleozoicas y mesozoicas, constituyen la base de baja permeabilidad del acuífero. El fallamiento subsecuente generó grabens asimétricos que acumularon gruesas secuencias de sedimentos continentales y depósitos volcánicos, creando las depresiones estructurales que ahora almacenan agua subterránea. Datos geofísicos y estratigráficos indican que el espesor del relleno de cuenca varía de aproximadamente doscientos a quinientos metros en Arizona y hasta alrededor de cuatrocientos cincuenta metros en Sonora, con las zonas más profundas alineadas a lo largo del Río Santa Cruz. Estas características geológicas y estructurales determinan la distribución espacial de materiales acuíferos, contrastes de permeabilidad y las trayectorias que dirigen el flujo subterráneo a través de la frontera internacional.

9.2.2. Clima e Hidrología Superficial

El entorno hidrológico regional es semiárido y fuertemente estacional. La precipitación es dominada por el Monzón de Norteamérica de julio a septiembre, con aportes invernales menores asociados a sistemas frontales del Pacífico. La precipitación anual aumenta con la elevación, desde aproximadamente 350 milímetros en el valle hasta más de 600 milímetros en zonas altas, mientras que la evapotranspiración potencial supera a la precipitación en la mayor parte de la cuenca. El flujo superficial en el Río Santa Cruz y sus tributarios es mayormente efímero; solo algunos tramos cercanos a Nogales, Arizona permanecen perennes, sostenidos por agua subterránea somera y efluentes tratados. La recarga ocurre mediante infiltración en frentes de montaña, percolación en los cauces del canal principal del Río Santa Cruz y tributarios efímeros, y aportes localizados por precipitación y retornos de flujos. Los registros hidrometeorológicos a largo plazo de ambos países muestran variabilidad comparable y evidencian que

fluctuaciones climáticas y eventos extremos controlan la recarga y los escurrimientos episódicos.

9.2.3. Hidrogeología

La caracterización hidrogeológica indica que el sistema acuífero está compuesto por tres unidades hidroestratigráficas principales. Los depósitos aluviales gruesos y no consolidados forman zonas altamente permeables y no confinadas cerca de los canales activos; los sedimentos de relleno de cuenca, semi-consolidados y con intercalaciones finas, generan condiciones semiconfinadas hacia el centro de la cuenca; y las rocas volcánicas y sedimentarias fracturadas proveen permeabilidad secundaria localizada a lo largo de los frentes de montaña. El flujo subterráneo generalmente avanza desde los márgenes de las zonas altas hacia el Río Santa Cruz, y después hacia el norte siguiendo el gradiente topográfico regional. Las variaciones en espesor del acuífero, fallamiento y composición litológica generan heterogeneidad notable en las conductividades hidráulicas y capacidades de almacenamiento.

9.2.4. Niveles de Agua Subterránea y Parámetros Hidráulicos

Las mediciones de niveles de agua subterránea y las pruebas hidráulicas confirman este comportamiento heterogéneo. Los niveles son someros cerca del Río Santa Cruz y se profundizan hacia los márgenes de la cuenca, mientras que los hidrogramas muestran oscilaciones estacionales y multianuales asociadas a la variabilidad climática. Las conductividades hidráulicas calculadas son mayores en sedimentos aluviales gruesos y menores en rellenos de cuenca finos; los coeficientes de almacenamiento indican condiciones predominantemente no confinadas a semiconfinadas. Una comparación de datos piezométricos de Arizona y Sonora resalta el valor de contar con conjuntos de datos binacionales, revelando que la profundidad al nivel de agua subterránea generalmente aumenta alejándose del canal del Río Santa Cruz, incluso en pozos ubicados en tributarios, y es mayor cerca de las montañas. Los datos de niveles de agua de 2011–2012 y 2025 varían entre 0 y 128 metros, y varios pozos muestran una variación mínima en el tiempo, indicando una variación limitada en los niveles de agua subterránea durante el periodo de registro.

9.2.5. Geoquímica

La composición química del agua subterránea refleja una evolución progresiva a lo largo de las trayectorias de flujo. Aguas cercanas a zonas de recarga son típicamente de tipo bicarbonatada-cálcica, convirtiéndose en sulfatada sódica o clorurada sódica dominadas aguas abajo a medida que incrementan los sólidos disueltos totales y aumenta la interacción agua–roca. La disolución de carbonatos, el intemperismo de silicatos y contribuciones menores de evaporitas explican los patrones iónicos observados. Variaciones verticales en la composición química muestran estratificación y mezcla entre zonas someras y profundas. Las concentraciones de elementos traza permanecen mayormente dentro de rangos naturales, y tendencias geoquímicas similares en ambos países confirman que procesos hidrogeoquímicos comparables actúan en toda la cuenca.

9.2.6. Modelación Conceptual y Numérica

Se han aplicado múltiples enfoques de modelación al TSCAS para apoyar la interpretación científica de las condiciones del agua subterránea. Los modelos conceptuales integran información geológica, hidrológica e hidrogeológica para describir la estructura y funcionamiento del sistema acuífero. Los modelos numéricos de flujo de agua subterránea locales cuantifican patrones de flujo, relaciones de recarga–descarga y comportamiento del almacenamiento bajo distintos escenarios hidrológicos. Los análisis de balance hídrico estiman magnitudes relativas de entradas y salidas, aclarando el equilibrio entre recarga, evapotranspiración y flujo base.

Una característica central de este estudio es la integración de datos binacionales y la colaboración entre instituciones de Estados Unidos y México a través del Programa de Evaluación de Acuíferos Transfronterizos (TAAP). Los conjuntos de datos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos y geoquímicos compartidos han permitido una descripción unificada del sistema acuífero y la armonización de métodos y estándares de datos.

9.3. Brechas Científicas y Limitaciones

Aunque el TSCAS ha sido caracterizado mediante una amplia colaboración binacional, el trabajo reveló algunas brechas y limitaciones que deberían guiar los esfuerzos técnicos futuros. La disponibilidad y continuidad de datos hidrogeológicos permanece desigual entre ambos lados de la frontera. Diferencias en frecuencia de monitoreo, instrumentación y resolución de datos limitan los análisis temporales y dificultan la evaluación de respuestas del acuífero a largo plazo. Muchos conjuntos de datos son previos a los protocolos binacionales coordinados y requieren armonización para asegurar comparabilidad.

La cobertura espacial de pozos adecuados para mediciones de niveles, pruebas hidráulicas y muestreo geoquímico sigue siendo limitada, particularmente en la porción sur del acuífero y en áreas donde el acceso es restringido. Esto limita la capacidad para delinear gradientes hidráulicos con confianza y detectar variaciones verticales de la química del agua subterránea o de condiciones de presión. De manera similar, la información litológica detallada está disponible únicamente para un subconjunto reducido de pozos, restringiendo la capacidad para refinar la representación tridimensional de unidades acuíferas y capas confinantes.

Los esfuerzos de modelación, aunque son científicamente valiosos, se han desarrollado a escalas locales empleando variaciones de condiciones de frontera y parametrizaciones. Estos modelos deben verse como componentes complementarios más que como una representación continua del sistema. Su integración en un marco conceptual consistente sigue siendo un desafío científico importante. Persisten incertidumbres respecto a magnitudes y distribución espacial de la recarga, debido a la naturaleza episódica de la precipitación y la complejidad de los procesos de infiltración en frentes de montaña.

Los datos geoquímicos, a pesar de ser robustos en la definición de la evolución de iones mayores, siguen siendo limitados en cobertura isotópica y trazadores de edad. Muestreos isotópicos adicionales

fortalecerían las interpretaciones de fuentes de recarga, tiempos de residencia y conectividad del flujo subterráneo. Finalmente, los datos sobre interacciones agua superficial–subterránea son escasos. Cuantificar estas interacciones mejoraría la comprensión del flujo base al Río Santa Cruz y los posibles impactos de la variabilidad hidrológica en ecosistemas ribereños. No obstante, los conjuntos de datos recopilados mediante el TAAP representan una base científica importante para investigaciones continuas.

9.4. Recomendaciones Científicas

Con base en los hallazgos técnicos y las brechas identificadas, se recomiendan varias líneas de acción científica para avanzar en el entendimiento del TSCAS. El monitoreo binacional continuo de niveles de agua subterránea, caudales y variables climáticas es indispensable para detectar tendencias temporales y refinar estimaciones de recarga y descarga. Establecer protocolos de observación unificados y repositorios digitales compartidos es fundamental, ya que mejoraría significativamente la comparabilidad y accesibilidad de los datos para investigadores en ambos lados de la frontera.

La expansión de redes de pozos para muestreo hidráulico y geoquímico es necesaria para reducir la incertidumbre espacial en el marco hidrogeológico. Se debe dar prioridad a sitios estratégicos que capturen adecuadamente los gradientes verticales y transiciones entre unidades hidroestratigráficas. El registro litológico mejorado y la aplicación de perfiles geofísicos en estos sitios permitirían delineaciones más precisas de los límites acuíferos y zonas de confinamiento.

Se recomienda continuar refinando los modelos numéricos, comenzando con el desarrollo de un modelo a escala regional que permita caracterizar los patrones de flujo a gran escala, definir condiciones de frontera apropiadas, e incorporar la heterogeneidad identificada en este estudio. Con base en este marco regional, modelos a escala local pueden ser refinados para representar la variabilidad de las propiedades hidráulicas, incorporar nuevos datos de campo conforme estén disponibles y evaluar áreas de interés específicas. La calibración y análisis de sensibilidad deben continuar destacando la estimación de recarga y las interacciones agua superficial–subterránea. Los componentes del balance hídrico se beneficiarían de reevaluaciones periódicas utilizando información climática y de uso de suelo actualizada.

La ampliación de investigaciones geoquímicas e isotópicas es recomendable para caracterizar la edad del agua, trayectorias de flujo, procesos de mezcla, y procesos hidrogeoquímicos como interacción agua-roca y reacciones oxidación-reducción. Campañas de muestreo coordinadas bajo protocolos analíticos compartidos asegurarían comparabilidad y permitirían rastrear componentes de flujo transfronterizo. Integrar la geoquímica con conjuntos de datos hidráulicos y geológicos dentro de un marco interpretativo unificado fortalecerá el modelo conceptual general del sistema acuífero.

Finalmente, se recomienda que los miembros del TAAP continúen fomentando la colaboración científica binacional mediante intercambios técnicos, armonización de datos e iniciativas de capacitación. El enfoque cooperativo que sustentó este estudio sigue siendo fundamental para mantener un

entendimiento compartido y basado en ciencia del Sistema Acuífero Transfronterizo Río Santa Cruz, y para informar futuras investigaciones hidrogeológicas binacionales.