

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**GEOMORFOMETRÍA DE CUENCAS MEDIANTE SIG: ARROYOS SAN CARLOS Y SAN ANTONIO, MANUEL BENAVIDES, CHIHUAHUA.**

**POR:**

**ING. NAYELI RODRÍGUEZ NÚÑEZ**

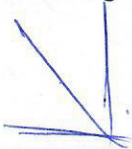
**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**


**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**


**MARZO 2023**

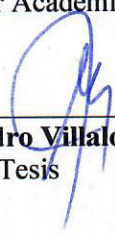


*“Geomorfometría de cuencas mediante SIG: Arroyos San Carlos y San Antonio, Manuel Benavides, Chihuahua”*. Tesis presentada por la Ing. Nayeli Rodríguez Núñez como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, ha sido aprobado y aceptado por:

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez**  
Director de la Facultad de Ingeniería

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Fernando Martínez Reyes**  
Secretario de Investigación y Posgrado

  
\_\_\_\_\_  
**M.I. Miguel Ángel González Núñez**  
Coordinador Académico

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Director de Tesis

**Febrero 2023**  
Fecha

**COMITÉ**

Dr. Alejandro Villalobos Aragón, Director de tesis  
Dra. Daphne Espejel García, revisor  
M.I. Miguel Ángel González Núñez, revisor  
Dr. Aldo Piñón-Villareal, revisor



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

16 de febrero de 2023.

**ING. NAYELI RODRÍGUEZ NÚÑEZ**

**Presente**

En atención a su solicitud relativa al trabajo de Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería en Hidrología, es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Alejandro Villalobos Aragón** para que lo desarrolle como Tesis, con el título: **“GEOMORFOMETRÍA DE CUENCAS MEDIANTE SIG: ARROYOS SAN CARLOS Y SAN ANTONIO, MANUEL BENAVIDES, CHIHUAHUA”**.

### **Índice de Contenido**

Agradecimientos

Resumen

Índice de contenido

Índice de tablas

Índice de figuras

1. Generalidades

1.1 Introducción

1.2 Justificación

2. Marco físico

2.1 Localización y vías de acceso

2.2 Clima

2.3 Flora y fauna

2.4 Fisiografía

2.5 Edafología

2.6 Uso de suelo y vegetación

2.7 Hidrografía

2.8 Hidrología

2.9 Geología

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
**CHIHUAHUA**

3. Marco teórico
4. Metodología
5. Discusión de resultados
6. Conclusiones y recomendaciones

Referencias consultadas

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**

**“naturam subiecit aliis”**

**EL DIRECTOR**

**M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ  
MARTÍNEZ**

**EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO**

**FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
U.A.CH.**



**R. FERNANDO MARTÍNEZ REYES**

**DIRECCIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



## **Dedicatoria**

*A mi amor, la luz en mis días oscuros.*

*A mis hijos, que mi esfuerzo sea aliento para alcanzar sus sueños.*

*A mi madre, de quien aprendí la resiliencia.*

*Y a ti, que desde que te fuiste vives en mí.*

## **Agradecimientos**

Agradezco la oportunidad brindada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua, que, al impulsar la formación de profesionistas, benefician la educación superior en el país.

Especial agradecimiento a los profesores de la Maestría en Ingeniería en Hidrología, de quienes obtuve grandes aprendizajes y me acercaron a alcanzar la meta de concluir de forma satisfactoria mi posgrado.

A mi tutor, el Dr. Alejandro Villalobos Aragón, mi guía en todo momento.

Y gracias a mis compañeros de generación, por hacer tan ameno este viaje.

## **Resumen**

En esta investigación se analizaron geomorfométricamente las cuencas hidrológicas de las corrientes San Carlos y San Antonio, localizados dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Santa Elena (APFFCSE) en Manuel Benavides, en la porción noreste del estado de Chihuahua. El área de estudio se localiza en una zona desértica, con escasa precipitación durante el año. Su geología caracteriza a la APFFCSE, pues se encuentran pliegues sedimentarios cretácicos, manifestaciones del vulcanismo terciario, entre otras litologías y estructuras. Sus características biológicas muestran una variación entre climas, vegetación y fauna, el desierto en el fondo de los valles y bosques en la cumbre de las sierras. Estos cambios suceden en una zona reducida, creando un ecosistema único, caracterizado por contar con varias especies endémicas y en estado de protección, es por todo lo anteriormente descrito, que la zona fue declarada en 1994, como Área Natural Protegida. El estudio geomorfométrico realizado consistió en analizar la información física del medio para determinar el comportamiento de la cuenca, con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (Arc GIS, versión 10.3). Se emplearon tres bases de datos para realizar el análisis y comparación. Del INEGI se obtuvieron datos vectoriales en escala 1:50,000 así como 1:250,000, y del satélite japonés ALOS, se utilizaron archivos DEM con tamaño de píxel de 12.5 m. Durante el análisis se decidió trabajar sólo con los resultados de ALOS PALSAR e INEGI 1:250,000, pues permitieron realizar un estudio comparativo. Los parámetros analizados fueron: área, perímetro, tipo de vertiente, longitud del cauce principal, relación de bifurcación, índice de pendiente media de la cuenca, coeficiente de compacidad, factor forma, relación de elongación, densidad de drenaje y orden de corriente. Ambas corrientes tienen cuencas de tamaño intermedio a grande y forma irregular y/o alargada. Debido a su carácter intermitente, muestran poca tendencia a inundaciones extremas. Sin embargo, al ubicarse en una zona desértica, la posibilidad de una precipitación extraordinaria, si bien pequeña, debe ser considerada. Se determinó que los datos que más se adecuan al marco físico del área es la escala 1:250,000 del INEGI, debido a su densidad de corrientes, propias de un medio desértico.



## Índice de Contenido

Agradecimientos .....	vii
Resumen.....	viii
Índice de Contenido .....	ix
Índice de Tablas .....	xi
Índice de Figuras.....	xi
1. Generalidades.....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Justificación .....	2
2. Marco Físico .....	4
2.1 Localización y Vías de acceso .....	4
2.2 Clima.....	5
2.3 Flora y Fauna .....	8
2.4 Fisiografía .....	10
2.5 Edafología.....	11
2.6 Uso de suelo y vegetación .....	13
2.7 Hidrografía.....	15
2.8 Hidrología .....	16
2.9 Geología.....	17



3. Marco Teórico.....	21
4. Metodología .....	26
5. Discusión de Resultados .....	29
6. Conclusiones y Recomendaciones.....	34
7. Referencias consultadas .....	36

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Datos de estaciones meteorológicas en el área de estudio (National Weather Service, 2022; Servicio Meteorológico Nacional, n.d.).....	7
<b>Tabla 2.</b> Especies protegidas por clase, dentro del APFFCSE, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 Protección Ambiental- Especies nativas de México de flora y fauna silvestres- Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio- Lista de especies en riesgo (SEMARNAT et al., 2013). ....	9
<b>Tabla 3.</b> Clasificación para las cuencas, de acuerdo con su superficie, propuesta por Campos Aranda (1998). ....	23
<b>Tabla 4.</b> Cartas empleadas para análisis geomorfométrico. ....	27
<b>Tabla 5.</b> Resultados del análisis geomorfométrico de las cuencas San Carlos y San Antonio. ....	30

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Localización APFFCSE en la frontera entre México y los EE. UU.....	4
<b>Figura 2.</b> Clima en el APFFCSE, <i>según la</i> Clasificación de Köpen, modificada por E. García (1973). ....	5
<b>Figura 3.</b> Unidades edafológicas presentes en APFFCSE. ....	11
<b>Figura 4.</b> Unidades vegetativas y uso de suelo en el APFFCSE.....	13
<b>Figura 5.</b> Hidrografía en APFFCSE. Hidrología superficial y subterránea en las imágenes de la porción inferior izquierda. ....	16
<b>Figura 6.</b> Geología y estructuras en la en APFFCSE.....	18
<b>Figura 7.</b> Orden de corriente con el método de Strahler (modificado de Strahler, 1954, 1957) (Singh, 2017). ....	24
<b>Figura 8.</b> Delimitación de las cuencas San Carlos y San Antonio.....	31
<b>Figura 9.</b> Cierre de las cuencas San Carlos y San Antonio.....	33



## 1. Generalidades

### 1.1 Introducción

El movimiento del agua a través de una cuenca se define por las características físicas que esta presenta. En esta investigación se analizaron las cuencas hidrológicas de las corrientes San Carlos y San Antonio, localizados ambos arroyos en la porción noreste del estado de Chihuahua, dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Santa Elena (APFFCSE). Esta zona fue declarada el 7 de noviembre de 1994, en el Diario Oficial de la Federación por gestión del Gobierno del Estado de Chihuahua como área protegida (*DECRETO Por el que se declara como Área Natural Protegida, con el carácter de Área de Protección de Flora y Fauna, La Región conocida como Cañón de Santa Elena, con una superficie de 277,209-72-12.5 Hectáreas, Municipios de Manuel Benavides y Ojinaga, Chih., 1994*).

Las características que hacen del Cañón de Santa Elena una zona de interés para procurar su preservación son la representatividad de la biodiversidad del Desierto Chihuahuense, ya que cuenta con gran cantidad de especies de flora y fauna con estatus de protección, además de riqueza geológica, hidrológica e histórica (Carabias Lillo *et al.*, 1997).

El arroyo San Carlos, consiste en una corriente de agua intermitente que nace en la elevación orográfica conocida como Sierra Rica, escurre hacia el este a través de la Sierra Azul y se convierte en la principal fuente de agua superficial para la comunidad de Manuel Benavides, continuando su trayecto en dirección noreste hasta encontrar el Río Bravo (INEGI, 2020c, 2020d). Por su parte, el arroyo San Antonio, es una corriente tributaria intermitente del Río Bravo, que nace en la Sierra Los Ángeles y se desarrolla en dirección noreste a través del Desierto Chihuahuense (INEGI, 2020d, 2020b)

En la zona, destacan Sierra Azul, Sierra El Mulato y Sierra Rica, localizadas hacia el oeste del área de estudio. Sierra Azul consiste en un pliegue anticlinal, que presenta de forma explícita la columna estratigráfica del Cretácico, con rocas intrusivas en el núcleo, hasta alcanzar calizas hacia la falda de la sierra (Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1996, 1997). Sierra El Mulato se compone de tobas riolíticas del terciario con fallamiento normal y lateral izquierdo; y Sierra Rica, se destaca por la presencia de obras mineras en calizas-lutitas cretácicas, con pórfidos andesíticos y riolíticos en la periferia de las rocas sedimentarias; y tobas riolíticas terciarias afloran en la cima (SGM, 1996, 1997).



Como se estableció previamente, las rocas ígneas se extienden por gran parte de la zona de estudio; tanto del lado mexicano como hacia la porción norteamericana (*Big Bend* en Texas, EE. UU.), se encuentran diversas investigaciones dedicadas a la caracterización de las rocas extrusivas, así como su datación y evolución magmática, rasgos estructurales, destacando las calderas, y su relación con calderas en la zona Trans-Pecos (Gregory, 1981; Gunderson et al., 1986; Henry & Price, 1984; McDowell & Chuchla, 2010).

Además del material ígneo, se encuentran abundantes afloramientos de rocas sedimentarias, especialmente calizas y lutitas de edad cretácica. La descripción de las rocas y formaciones, así como su potencial carbonífero se encuentra detallado por Cabrera et al., (1984), y Del Arenal, (1964).

Dentro del acervo bibliográfico del Servicio Geológico Mexicano (SGM), existen reportes de análisis de minerales radioactivos en las inmediaciones de la Sierra El Mulato, así como muestras colectadas en el Cañón de Santa Elena (Comité Directivo para la Investigación de los Recursos Minerales de México (CDIMM), 1948; Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), 1963).

Como se mencionó previamente, el marco físico del área de estudio ha sido analizado con anterioridad desde una perspectiva geológica, sin embargo, la información disponible sobre la interacción entre el agua y la geología es escasa. Solamente se tuvo acceso a dos trabajos de licenciatura, en donde Miranda Magallanes, (2016) y Rodríguez Perchez, (2017), realizaron análisis hidrogeoquímicos y orgánicos (*e-coli*) de las corrientes San Carlos y San Antonio, para evaluar el efecto de las actividades pecuarias en dichas corrientes. Los resultados muestran equilibrio químico con el medio geológico, aunque existe riesgo de contaminación antropogénica por las actividades ganaderas, agrícolas y urbanas que se practican en las comunidades cercanas.

El análisis que se pretende hacer en esta tesis permitirá conocer el viaje del agua a nivel superficial con base en las características físicas de la cuenca hidrológica, así como su interacción con el medio subterráneo.

## **1.2 Justificación**

El APFFCSE representa una zona de gran interés natural, debido a la presencia de especies naturales endémicas y en riesgo que representan la biodiversidad del Desierto





Chihuahuense y, del estado de Chihuahua en particular. Sin embargo, las investigaciones desarrolladas en el APFFCSE son escasas y se centran en la geología, flora y fauna del lugar, dejando de lado el comportamiento del agua superficial y subterránea.

La caracterización de las cuencas de los arroyos San Carlos y San Antonio aportará conocimiento y comprensión del complejo sistema hidrogeológico que prevalece en el Cañón de Santa Elena, y servirá como base al estudio hidrológico e hidrogeológico que se plantea desarrollar posteriormente en el área como parte del proyecto de investigación conjunto entre investigadores de las universidades de *Angelo State*, *NMSU Sul Ross State* (ambas en Texas, EE. UU.) y de la Universidad Autónoma de Chihuahua, con el apoyo y supervisión de la CONANP. Los resultados que se obtengan de esta investigación podrán servir como base y antecedente para el manejo adecuado del recurso hídrico, a corto y mediano plazo, por las entidades gubernamentales competentes.

Hasta hace un tiempo, los estudios hidrológicos puros eran empleados en la caracterización de una cuenca hidrológica, sin embargo, los cambios climáticos (y sus efectos en los ecosistemas y en la población) que se experimentan actualmente, hacen necesario un estudio multidisciplinario de (y en) las cuencas, puesto que dichas variaciones climáticas han repercutido seriamente en la economía de las poblaciones.

Localmente, la principal preocupación de los habitantes y del personal de la Comisión Nacional de Zonas Protegidas es la intención de algunos habitantes de comenzar con la siembra y establecimiento de huertas nogaleras. Este tipo de cultivo ha requerido en otras zonas del estado, de enormes cantidades de agua, lo que presupone que posiblemente afecte en un futuro a esta zona protegida, debido a los posibles elevados valores de extracción, que afectarían a la disponibilidad y al balance hídrico de la zona.

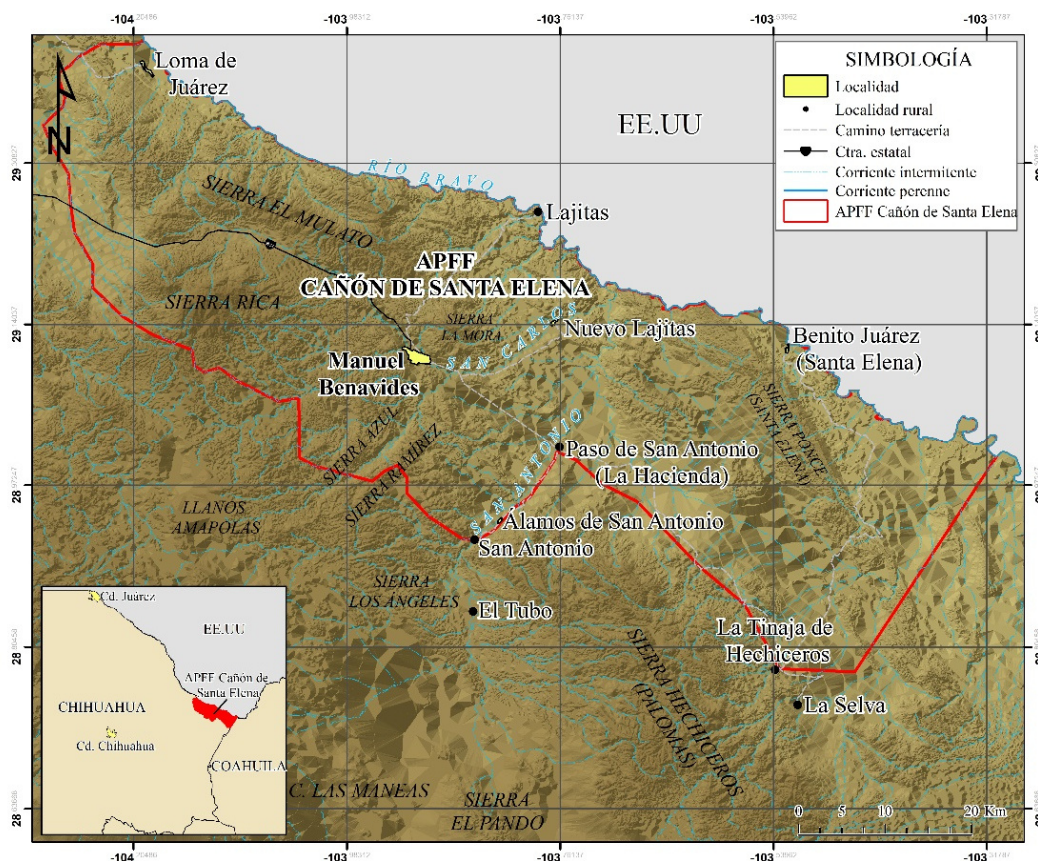
Es imperativo entonces, el comenzar a realizar trabajos de caracterización geomorfométrica que permitan conservar la riqueza ecológica de esta zona y al mismo tiempo otorgar opciones para el desarrollo de actividades económicas que no afecten en demasía a los sistemas ecológicos presentes.



## 2. Marco Físico

### 2.1 Localización y Vías de acceso

El Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Santa Elena (APFFCSE), se localiza en la porción norte de México, en el extremo noreste del estado de Chihuahua, en sus límites con Coahuila y EE. UU., como se muestra a continuación en la Figura 1:



**Figura 1.** Localización APFFCSE en la frontera entre México y los EE. UU.

Las corrientes denominadas como San Carlos y San Antonio nacen hacia el este y sur, respectivamente, del APFFCSE y se desarrollan dentro de la poligonal del área protegida en dirección N-NE hasta encontrar el Río Bravo, frontera internacional entre México y los EE. UU.

Las comunidades de interés dentro de la zona de estudio son: Manuel Benavides, cabecera del municipio homónimo, la cual cuenta con 916 habitantes (INEGI, 2020d), siendo la más poblada en la zona. En orden descendiente, de acuerdo con la cantidad de habitantes, continúan Álamos de San Antonio con 131, Paso de San Antonio (La Hacienda) con 81,





La clasificación de Köpen indica que los climas tipo *B* se localizan en la zona del altiplano mexicano, en altitudes menores de 1500 m. Los climas *BS* se encuentran bordeando a los *BW* en el norte de la altiplanicie.

Los climas *BS*, son designados por Köpen como “*climas de estepa*”, mientras García los nombra como *secos o áridos*, debido a la vegetación dominante: cactáceas, matorrales espinosos o inermes, etc.

Los climas *BW* en la clasificación de Köpen se nombran como “*climas del desierto*”, la modificación por García es climas *muy áridos o muy secos*. Menciona que el término estricto de desierto hace referencia a zonas completamente deshabitadas, situación que no siempre se cumple en los climas áridos.

La distribución de los climas previamente descritos se muestra en la Figura 2 y se describe brevemente a continuación (García, 1973; INEGI, 2008a):

- ***BWhw***. Clima muy árido, semicálido, cuya temperatura media anual oscila entre 18°C y 22°C. La temperatura del mes más frío es menor a 18°C. La temperatura del mes más caliente supera los 22°C. La temporada de lluvias importantes ocurre en verano, y el porcentaje de precipitación de invierno varía del 5 % al 10.2 % del total anual. Se extiende en la porción norte de la zona de estudio, abarca casi en su totalidad el área del APFF Cañón de Santa Elena. Dentro de este clima se localizan las sierras El Mulato, La Mora y Azul.
- ***BSok(x')***. Clima árido, templado, cuya temperatura promedio anual oscila entre 12°C y 18°C. En el mes más frío la temperatura varía entre -3°C y 18°C. El mes más caliente es menor a 22°C. Las precipitaciones se presentan durante todo el año, y el porcentaje de lluvia en invierno es superior al 18% del total anual. Se presenta hacia el sur del clima *BWhw* en las planicies que se forman entre la Sierra Rica, Sierra Los Ángeles, Sierra Hechiceros y Sierra El Pando.
- ***BSIk(x')***. Clima semiárido y templado. La temperatura media anual se encuentra entre 12°C y 18°C; la temperatura del mes más frío varía entre -3°C y 18°C. El mes más cálido presenta temperaturas menores a 22°C. Cuenta con régimen de lluvias de verano y el porcentaje de lluvia invernal es mayor al 18% del total anual. Se presenta en las partes altas de la Sierra Rica y se extiende hacia el sur hasta los Llanos Amapolas. También corona las mayores elevaciones de la Sierra Hechiceros.





- **BSohw.** Clima árido, semicálido, temperatura media anual entre 18°C y 22°C. La temperatura del mes más cálido es superior a 22°C, y el mes más frío presenta temperatura menor a 18°C. Cuenta con régimen de lluvias de verano y el porcentaje de lluvia que se presenta en la temporada invernal se encuentra entre 5 a 10.2% del promedio anual. Predomina hacia el sur oeste de la zona de estudio, en las faldas de los Cerros El Encinoso.
- **BWh(x').** Clima muy árido, semicálido. La temperatura media anual oscila entre 18° y 22°C. La temperatura del mes más frío es menor a 18°C y la temperatura del mes más cálido supera los 22°C. Presenta lluvias durante todo el año y el porcentaje de lluvia invernal es mayor al 18% del total anual. Se presenta en la zona este del APFFCSE y hacia el sur, sobre las comunidades La Tinaja de Hechiceros y La Selva.

Adicional a los datos obtenidos de la información climatológica disponible en las cartas de INEGI, se obtienen datos de estaciones climatológicas cercanas al área de estudio. En la porción mexicana, las estaciones climatológicas son escasas. Hacia el oeste del área de estudio se encuentra la estación Ojinaga, actualmente activa, en la zona central se encuentra la estación Manuel Benavides, inactiva desde 1987, y hacia el suroeste otra estación inactiva, llamada Maijoma. En territorio norteamericano, dentro del Parque Nacional Big Bend, se encuentran tres estaciones más, Lajitas, Chisos y Castolón. En la siguiente tabla se muestran sintetizados los datos procesados de las estaciones climatológicas previamente mencionadas, los datos se obtienen de las bases de datos del Servicio Meteorológico Nacional (n.d.) y National Weather Service (2022).

**Tabla 1.** Datos de estaciones meteorológicas en el área de estudio (National Weather Service, 2022; Servicio Meteorológico Nacional, n.d.).

	<b>Ojinaga</b>	<b>Manuel Benavides</b>	<b>Maijoma</b>	<b>Castolón TX</b>	<b>Chisos TX</b>	<b>Lajitas TX</b>
Record histórico	75-88/91-03	62-86	61-85	81-21	47-21	78-21
Precipitación total media anual (mm)	234.0	332.0	362.9	314.85	570.7	259.8
Mes más húmedo (mm)	Julio (39.9)	Septiembre (73.3)	Septiembre (73.3)	Julio (42.4)	Julio (84.8)	Julio (50.5)
Mes más seco (mm)	Marzo (4.71)	Enero (5.4)	Marzo (5.6)	Marzo (5.3)	Marzo (10.4)	Marzo (5.3)
Temperatura media anual (°C)	21.49	19.6	18.7	21.6	16.25	21.8
Mes más frío (°C)	Enero (10.7)	Enero (9.8)	Enero (9.7)	Enero (10.9)	Enero (8.7)	Enero (10.7)
Mes más cálido (°C)	Junio (30.9)	Julio (28.2)	Junio (26.1)	Julio (31.3)	Junio (24)	Junio (30.9)



Carabias Lillo *et al.* (1997) mencionan que Ojinaga describe la porción oeste del APFFCSE, mientras Manuel Benavides detalla las condiciones climatológicas en la zona centro-sur, Chisos, por sus características montañosas es compatible con la Sierra Rica, y Castolón es similar a la zona fronteriza del Cañón de Santa Elena.

La precipitación en zonas bajas oscila entre 230 mm a 360 mm, la excepción es la estación Chisos, debido a su clima montañoso imperante (Carabias Lillo *et al.*, 1997). De igual manera actúa como valor atípico en la temperatura, al ser más frío que el resto del área de estudio, en donde la temperatura varía de 19°C a 21°C. La temporada seca se encrucece de enero a marzo, mientras los meses más húmedos son de julio a septiembre. La temperatura más baja se encuentra en el mes de enero, y la más alta en junio y julio.

### **2.3 Flora y Fauna**

La presencia de especies bióticas endémicas y representativas es una de las características que hacen del Cañón de Santa Elena un lugar digno de preservación. Debido a las condiciones físicas, como altitud, clima y geología, entre muchas otras, se genera un ecosistema diverso en un espacio relativamente pequeño.

La gran diversidad de la zona de estudio genera también grandes conflictos en cuanto a la preservación, el cambio en el uso de suelo, además de la destrucción del hábitat de las diversas especies, ha provocado una reducción considerable en las comunidades bióticas (Carabias Lillo *et al.*, 1997; SEMARNAT *et al.*, 2013).

El Programa de Manejo del APFF Cañón de Santa Elena (SEMARNAT *et al.*, 2013), determina las siguientes especies consideradas en peligro de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Tabla 2).

En las elevaciones bajas, dentro de las planicies se encuentran matorrales micrófilos de guamis, hojaseén, mariola, cenizo y guayacán, ocasionalmente mezclados con mezquite, huizache y gatuño. El cambio abrupto de elevación en la zona de la Sierra Rica provoca que el desierto se encuentre en contacto con el bosque de coníferas, creando una breve transición de pastizal mediano y amacollado arborecente. Aunque la extensión del bosque es muy reducida, debido a su presencia en medio del desierto se vuelve único en el estado, contando con la presencia de puma y oso negro (Carabias Lillo *et al.*, 1997; SEMARNAT *et al.*, 2013).



**Tabla 2.** Especies protegidas por clase, dentro del APFFCSE, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 Protección Ambiental- Especies nativas de México de flora y fauna silvestres- Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio- Lista de especies en riesgo (SEMARNAT *et al.*, 2013).

Clase	Amenazada (A)	Peligro de extinción (P)	Sujeta a protección especial (Pr)	Probablemente extinta en el medio silvestre (E)
<i>Amphibia</i>			Sapo verde, Rana del Río Grande, Rana de Moctezuma, Sapo boca angosta oliváceo.	
<i>Reptilia</i>	Lagartija de collar común, Lagartija sorda mayor, Culebra real común, Culebra chirrionera, Culebra sorda mexicana, Culebra listonada.	Lagartija perrilla arenera, Víbora de cascabel <i>Crotalus molossus</i> .	Tortuga pecho quebrado, Culebra parcha de Baird, Víbora de cascabel ( <i>Crotalus atrox</i> , <i>Crotalus scutulatus</i> , <i>Crotalus viridis</i> ), Cascabel verde.	
Aves	Gavilán azor, Águila de Swainson, Halcón aplomado, Halcón de las praderas, Gorrión sabanero, Colorín azulosa, Pato mexicano, Pato tejano, Chorlito llanero.	Vireo saucero, Vireo gorra negra, Reyezuelo común.	Gavilán de Cooper, Aguillilla negra común, Halcón peregrino, Búho llanero, Lechucita llanera, Codorniz Moctezuma, <i>Nyctiphrynus mcleodii</i> , Colibrí pico ancho, Picuchita norteña, Clarín jinlgüero, Clarín norteño, Chipe rabadilla naranja, Cardenal rojo, Grulla gris.	Búho enano, Carpintero de pechera de Guadalupe, Saltapared tepetatero.
<i>Mammalia</i>	7 Musaraña, Murciélago trompudo, Murciélago hocicudo mayor, Zorra norteña, Tejón, Nutria de río sudamericana.	Castor americano.	Eudermis maculatum, Borrego cimarrón.	

El lomerío ígneo bajo es la zona propicia para el desarrollo de una vegetación rosetófila, en donde abundan la lechuguilla y el sotol, además de diversidad de cactáceas (Carabias Lillo *et al.*, 1997; SEMARNAT *et al.*, 2013)

En las zonas donde se presentan escurrimientos significantes se crean comunidades ribereñas constituidas en su mayoría por álamos y sauces. Algunas de las especies animales



que se encuentran son murciélago, coyote, mapache y ratón, dentro de los mamíferos menores; aves como pato de collar, correcaminos y golondrina; sapos y ranas dentro de los anfibios; y tortugas, geckos, víbora casera y cascabel de diamantes en los reptiles (Carabias Lillo *et al.*, 1997; SEMARNAT *et al.*, 2013).

El pastizal se encuentra en las zonas donde el matorral rosetófilo encuentra limitantes de altitud, humedad y suelo. Se desarrolla en zonas de mayor elevación, como por ejemplo la parte baja de la Sierra Rica (Carabias Lillo *et al.*, 1997; SEMARNAT *et al.*, 2013).

La fauna que domina en la zona de matorral, dentro de los mamíferos mayores es el venado bura y el puma, en los menores liebre, rata, gato montés, jabalí y murciélago entre otros; aves como capulinero, carpintero, aguililla y lechuza; sapos dentro de la rama de los anfibios; y tortuga, gecko, lagartija, culebra y serpiente como reptiles. Dentro de los ecosistemas acuáticos, se desarrollan mojarra, lobina negra, bagre, sardina de Chihuahua y charal, entre otros (Carabias Lillo *et al.*, 1997; SEMARNAT *et al.*, 2013).

## 2.4 Fisiografía

El área de estudio se encuentra dentro de la provincia fisiográfica denominada Sierras y Llanuras del Norte; y en la subprovincia de Llanuras y Sierras Volcánicas (INEGI, 2001; Lugo Hubp & Córdova, 1992; Raisz, 1964). Consiste en elevaciones montañosas que se extienden en dirección N-S, separadas por depresiones de origen tectónico con orientación N-NW. En la porción oeste del área de estudio (ver Fig. 1), se observan las Sierras Ponce, Hechiceros y El Pando con orientación N-W, de forma subparalela se encuentra también la Sierra Los Ángeles, entre estos rasgos geomorfológicos se crean pequeños valles alargados.

En la zona central se desarrollan las Sierras Ramírez y Azul, cuya separación da lugar a un valle angosto donde escurre uno de los arroyos que alimenta al San Carlos. Hacia el oeste se encuentran las Sierra Mulato y Sierra Rica con elongación hacia el N-W, y en el valle que se forma entre ambas se da paso a la Carretera Estatal 200. Hacia el sur de la zona de estudio se encuentran depresiones de mayor extensión, como Llanos Amapolas o los valles al norte se Sierra El Pando.







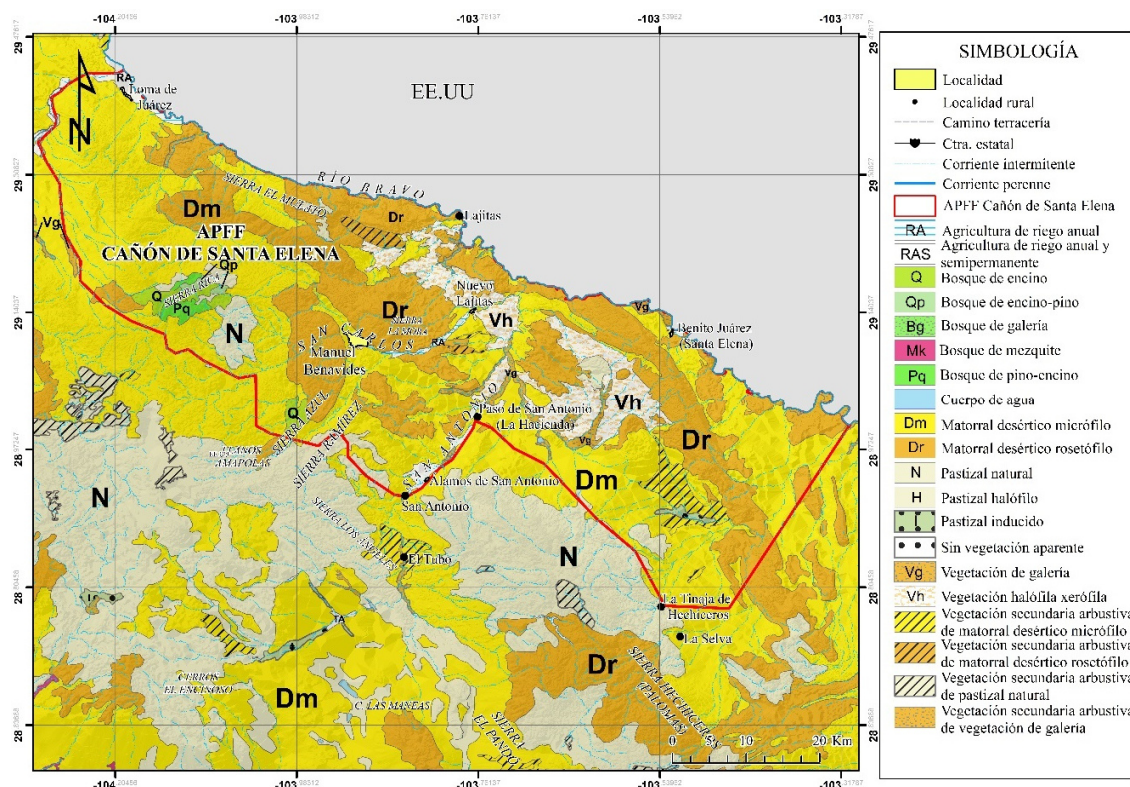
la superficie (Sierra El Mulato, La Mora, Rica, Azul, Ramírez, Ponce, Los Ángeles y Hechiceros), además de las zonas de piedemonte que rodean las sierras.

- **Calcisol.** Como su nombre lo indica, el *calcisol* se caracteriza por la presencia de carbonatos que se acumulan de forma secundaria creando capas de espesor superior a 10 cm en los primeros 100 cm de suelo. Se desarrolla en las depresiones que se forman entre las sierras.
- **Paheozem.** Cuenta con abundancia de materia orgánica, lo cual le brinda un color oscuro, carece de carbonatos en su matriz. Se encuentra como transición entre *leptosol* (roca dura) y *calcisol* (sedimentos con carbonatos), en las zonas de piedemonte.
- **Regosol.** Se considera un suelo muy poco desarrollado, es decir, es similar a la roca madre y guarda aún características de esta. Se encuentra de forma localizada en la falda norte de Sierra El Mulato y hacia el oeste de Sierra Ponce.
- **Kastañozem.** Presenta color oscuro, que se forma por la abundancia de materia orgánica. Cuenta con cementación secundaria carbonatada. Parches localizados de *kastañozem* se localizan al sur de Sierra Rica.
- **Cambisol.** Se caracteriza por ser un suelo con intercambio iónico, presenta alteración y remoción, cuenta con espesor mínimo de 15 cm, y no tiene consistencia quebradiza. Se encuentra de forma localizada en Llanos Amapolas y al este de Sierra El Mulato, cerca de Loma de Juárez.
- **Fluvisol.** Cuenta con mínimo 50 cm de espesor, consiste en una serie de capas estratificadas o sedimentos recientes de origen fluvial, marino o lacustre. Se concentra en el cauce de los arroyos San Carlos y San Antonio, y de forma más abundante en los bancos que crean los bancos del Río Bravo.
- **Solonchank.** Suelo que presenta enriquecimiento secundario de sales solubles en agua (horizonte sálico) en los primeros 50 cm. Se localiza en la unión entre tributarios del San Antonio, al norte del Paso de San Antonio.
- **Luvisol.** Se caracteriza por la presencia de horizonte árgico (acumulación de arcillas). Se presenta al sur de la zona de estudio, cerca de los Cerros Las Maneas.



## 2.6 Uso de suelo y vegetación

La descripción de uso de suelo y vegetación del área de estudio se basa en la Carta del Continuo Nacional, desarrollado por INEGI (2021), ver la Figura 4 para mayor detalle espacial.



**Figura 4.** Unidades vegetativas y uso de suelo en el APFFCSE.

Como se ha mencionado previamente, el área de interés se encuentra dentro del ecosistema conocido como Desierto Chihuahuense. Debido a esto, es común encontrar unidades vegetativas propias de climas secos (INEGI, 2008b, 2015b, 2021), como lo es el matorral desértico micrófilo (Dm), el cual se extiende en grandes extensiones en la zona, especialmente en la porción norte y sur. Consiste en vegetación baja, de 0.5 a 1.5 m, que puede desarrollarse en áreas con precipitación menor a los 100 mm anuales, cubriendo sólo el 3 % de la extensión en zonas hostiles, mientras en climas menos desfavorables llega a ocupar el 20 %. En zonas de pendiente suave abundan *Larrea*, conocida coloquialmente como *gobernadora*, y *Ambrosia* (INEGI, 2008b, 2015b, 2021).





En las zonas de mayor elevación de las Sierras Mulato, La Mora, Rica, Ramírez, Ponce y Hechiceros, se encuentra coronando el matorral desértico rosetófilo (Dr), se caracteriza por sus hojas en formas de roseta, puede tener o carecer de espinas, y presenta tallo poco desarrollado o ausente en su totalidad (INEGI, 2008b, 2015b, 2021). Muestra preferencia por *xerosoles* y/o sierras sedimentarias. Destaca la lechuguilla (*Agave lechuguilla*) como una de las especies predominantes.

En la zona central, en los valles de mayor extensión, se desarrolla el pastizal natural (N), consiste en una comunidad dominada por especies de gramíneas y graminoides. Crece en suelos medianamente profundos y de preferencia ígneos, en alturas de 1,100 a 2,500 msnm, y con temperaturas extremas, propias del desierto, altas temperaturas durante el día y descenso drástico en la noche, con nevadas frecuentes en temporada invernal (INEGI, 2008b, 2015b, 2021).

En el área norte, donde convergen San Carlos y San Antonio, se crea una comunidad de herbáceas o arbustivas, conocida como vegetación halófila xerófila. Se desarrolla en las partes bajas de las cuencas, donde existe mayor concentración de sales. Se caracteriza por especies de baja altura, dominancia de pastos rizomatosos y tallos rígidos, y escasez de especies arbustivas (INEGI, 2008b, 2015b, 2021).

En zonas localizadas de los tributarios que forman el arroyo San Antonio, se encuentran áreas de pastizal inducido (I) en donde la vegetación es dominada por gramíneas o graminoides y se genera como consecuencia del desmonte de la vegetación natural, en áreas agrícolas abandonadas o lugares donde ocurren incendios continuamente (INEGI, 2008b, 2015b, 2021).

La vegetación de galería se concentra en los cauces del Río Bravo y en los arroyos que forman el San Antonio. Se caracteriza por comunidades arbustivas con elementos subarbóreos ocasionales y necesitan de humedad constante (INEGI, 2008b, 2015b, 2021). Las elevaciones que se encuentran en la Sierra Rica permiten el desarrollo de bosques de encino y pino, que se caracterizan por comunidades vegetativas del género *Quercus* (encinos, robles) y *Pinus spp* (INEGI, 2008b, 2015b, 2021).

Dentro de la zona de estudio se encuentran áreas de vegetación secundaria, la cual se produce cuando un tipo de vegetación es eliminado o alterado por acción humana o procesos naturales, dando lugar a una nueva comunidad vegetal que es significativamente diferente a



la original, y con estructura y composición florística heterogénea. Al este de Llanos Amapolas y oeste de la Tinaja de Hechiceros se encuentran áreas de vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural; vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo se extiende como parches dispersos en toda la zona de estudio, y secundaria arbustiva de matorral desértico rosetófilo se localiza en el norte, cerca de la Sierra El Mulato (INEGI, 2008b, 2015b, 2021).

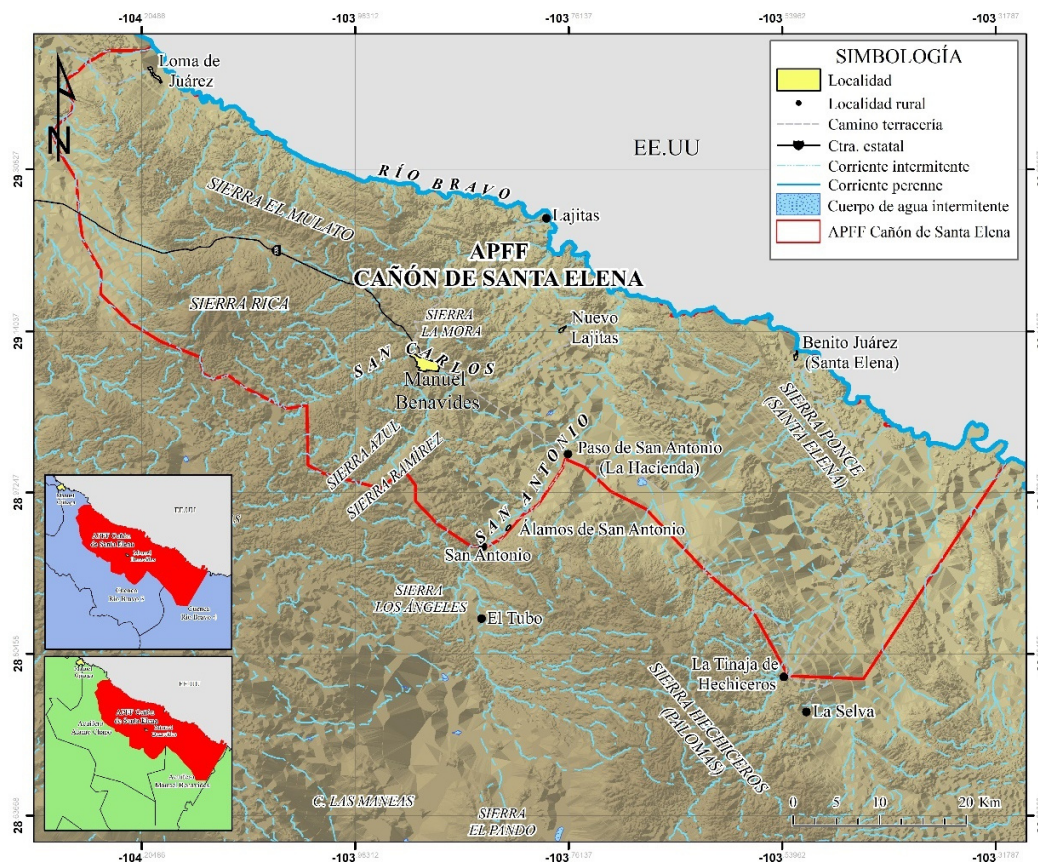
Las actividades antropogénicas que generan impactos en la vegetación, debido a su modificación o desmonte en total, además de la vegetación secundaria, son los asentamientos humanos, en donde la población con mayor impacto es la cabecera municipal, Manuel Benavides; y la agricultura (INEGI, 2008b, 2015b, 2021).

La Agricultura de riego anual (RA) se concentra en la ribera del Río Bravo, cerca de la comunidad Loma de Juárez y al sureste en Benito Juárez (Santa Elena), en las zonas aledañas a Manuel Benavides y el arroyo San Carlos. Riego anual y semipermanente se encuentra únicamente en Loma de Juárez, y áreas de temporal anual en los arroyos cercanos a Loma de Juárez, en los tributarios del arroyo San Carlos y a lo largo del arroyo San Antonio (INEGI, 2008b, 2015b, 2021).

## **2.7 Hidrografía**

Al localizarse en una zona desértica con clima seco, es de esperar que la mayoría de las corrientes sean de carácter intermitente, como se muestra a continuación en la Figura 5.

El patrón de drenaje en el área de estudio es dendrítico, y sin evidencia de control estructural, nace en los puntos altos de las sierras en el área, creando un escurrimiento que desemboca hacia El Río Bravo. Se observan también pequeñas lagunas intermitentes en el fondo de los valles, las cuales sólo aparecen en temporada de lluvias (INEGI, 2015a).



**Figura 5.** Hidrografía en APFFCSE. Hidrología superficial y subterránea en las imágenes de la porción inferior izquierda.

## 2.8 Hidrología

### 2.8.1 Hidrología superficial

Como se mencionó previamente, en la descripción hidrográfica, el agua superficial que escurre en la zona de estudio es de carácter intermitente, y se vierte en su totalidad hacia el Río Bravo. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), divide el territorio nacional en cuencas hidrográficas, la mayoría del área de estudio se encuentra dentro de la Cuenca Río Bravo 3, mientras el extremo este se localiza dentro de la Cuenca Río Bravo 4 (porción inferior izquierda de la Figura 5, en color azul).

La CONAGUA publica periódicamente la disponibilidad media anual de las cuencas que forman el territorio nacional, la última actualización fue publicada en el Diario Oficial de la Federación, donde se expone que ambas se encuentran en estado de déficit, con un volumen de salida de -571.495 millones de metros cúbicos cada una (CONAGUA, 2020b).



Las variables que se involucran en el cálculo de disponibilidad incluyen el escurrimiento natural, que se determina a partir de la precipitación medida en estaciones climatológicas, extracción de aguas superficiales, importaciones, exportaciones y volumen comprometido aguas abajo, entre otros.

### **2.8.2 Hidrología subterránea**

En el ámbito subterráneo, al igual que el agua superficial, la CONAGUA delimita acuíferos de los cuales analiza las variables involucradas en el almacenamiento, flujo y extracción del agua subterránea, para publicar la disponibilidad del recurso.

La zona oeste del área de estudio pertenece al acuífero Álamo Chapo (0842), mientras la zona Este se encuentra dentro del acuífero Manuel Benavides (0839), dividiendo el flujo subterráneo del APFFCSE en dos vertientes, como se observa en la porción inferior izquierda de la Figura 5, en color verde.

La actualización de disponibilidad media anual de los acuíferos más reciente fue publicada en 2020 (CONAGUA, 2020a), en el documento se menciona que el acuífero Álamo Chapo cuenta con una disponibilidad de 40.001741 millones de metros cúbicos, misma que ha sido calculada con el *método rudo*, que se basa en características intrínsecas del acuífero, partiendo de la precipitación, se estima la probabilidad de infiltración con los datos de geología del Servicio Geológico Mexicano, uso de suelo y edafología del INEGI, y se toman en cuenta los permisos de bombeo y caudales, los cuales son otorgados por CONAGUA.

Por su parte, la disponibilidad del acuífero Manuel Benavides (CONAGUA, 2020a), es de la mitad, con 22.858532 millones de metros cúbicos, cuyo valor fue igualmente determinado por el *método rudo*, como ya se mencionó anteriormente.

## **2.9 Geología**

La información geológica-estructural que se empleó en la descripción de la litología del área de estudio proviene de las cartas geológico-mineras del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

El área de estudio se encuentra en la unión de 4 cartas geológico-mineras, identificadas como Ojinaga (H13-8), Manuel Benavides (H13-9), Ciudad Delicias (H13-11)







concordante caliza y lutita del Aptiano, que pertenecen a la formación La Peña (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).

En la estructura anticlinal también se encuentran calizas y lutitas de edad Albiano-Cenomaniano, que componen una fuerte secuencia carbonatada con cambios en facies en sentido vertical y horizontal, las cuales representan las formaciones Glen Rose - Benigno (caliza y lutita (Ka(i)Cz-Lu)), Bronce - Telephone Canyon – West Nueces (lutita (KaLu)), Finlay-Del Carmen-Edwards (caliza y lutita (KaCz-Lu)) y Benavides-Sue Peak-McKnight (lutita y caliza (KaLu-Cz)) (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).

En continuidad con la estratigrafía del lugar se encuentra la formación Loma de Plata (Albiano superior), que consiste en caliza nodular en estratos delgados con cuerpos de caliza masivos y con bandas de pedernal. Además de formar parte de la secuencia de Sierra Azul, se encuentra en la Sierra Rica, donde aflora por fallamiento normal, Sierra Ponce (anticlinal Santa Elena) y al sur en Llanos Amapolas (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).

El Grupo Washita (formaciones Del Río y Buda) se encuentra en Sierra Azul y el pliegue anticlinal Santa Elena que forma la Sierra Ponce, que consiste en alternancia de caliza arcillosa y lutita en estratos delgados y medianos, perteneciente al Cretácico Superior (Cenomaniano) (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).

La unidad sedimentaria más abundante en la zona de estudio es la formación Ojinaga (KcetLu-Cz), la cual sobreyace al Grupo Washita de forma concordante y transicional (Cenomaniano-Turoniano). Se presenta como estratos delgados de lutita, caliza negra laminar y arenisca creando una transición entre calizas y rocas terrígenas (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).

En el Cenomaniano superior al Santoniano se observa un cambio, de rocas carbonatadas a terrígenas, representadas por caliza y lutita de la formación San Vicente – Austin (KcrossCz-Lu) y lutita – caliza de la formación Pen (KcrossLu-Cz) (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b). Coronando la geología del lugar se encuentran las rocas ígneas del Terciario, consisten en flujos y piroclastos de composición máfica y félsica. Andesitas y tobas andesíticas (ToA-TA) del Oligoceno se localizan al norte, en la parte baja de la Sierra El Mulato, hacia el este de la Sierra Ponce, y en la porción central del área de estudio, en la Sierra Ramírez y hacia el N-W de la Sierra Hechiceros (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).



Sobreyaciendo a las andesitas se encuentran riolitas y tobas riolíticas (ToTR-R). Forman la parte alta de la Sierra El Mulato, Sierra Rica, Sierra Los Ángeles y Sierra Hechiceros, además de extenderse por gran porción del S- SW (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b). Las unidades más recientes se forman en los valles, dando lugar a conglomerados, coluviones y aluviones.

### **2.9.1. Tectónica**

Como parte del primer evento estructural dúctil-frágil presente en el área se tienen los pliegues anticlinales de rumbo norte Sierra Azul y Santa Elena, de origen Laramídico. El evento compresivo también dio lugar a la cabalgadura Sierra Azul, que se localiza en el flanco este de la estructura (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b). Posteriormente a la Orogenia Laramide, se presenta el evento distensivo de Sierras y Cuencas y la apertura del rift del Río Grande (Cenozoico), el cual genera en su mayoría fallas normales, y escasas fallas laterales. El rumbo preferencial de las fallas normales es NW-SE con inclinación hacia el NE y SW, cuyas longitudes varían de 5 a 20 km, destacando El Mulato (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).

Hacia el este se encuentra la falla Santa Elena en la Sierra Ponce, cuyo extremo NW se bifurca formando la falla Tres Marías, la cual presenta un desplazamiento vertical de más de 300 m. Paralelo a este sistema, hacia el oeste, se encuentra el lineamiento Manuel Benavides. Hacia el oeste de la Sierra Rica, se aprecian los rasgos estructurales propios de una caldera, fallas normales en forma de semicircular. Esta geoforma es descrita por Henry & Price (1984), quienes la nombran Caldera San Carlos, y forma parte de la provincia Trans-Pecos.

En la zona de estudio se encuentra la superposición de las calderas San Carlos, previamente mencionada, y Santana, en conjunto reciben el nombre de Complejo de Caldera Sierra Rica. Son consideradas calderas grandes, de 25 a 32 km de diámetro.

La Caldera San Carlos es más antigua y se formó hace aproximadamente 30 Ma durante la expulsión de la toba homónima, cuyo volumen se asume que cubrió las evidencias del borde de caldera, además de esto, en el centro del pliegue anticlinal que forma la Sierra Rica se emplaza un plutón granítico en forma de banana (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).

La caldera Santana es más joven, formada hace 28-29 Ma, la mayoría del material expulsado se emplazó dentro del anillo de la caldera, aunque una porción se esparció hacia



el extremo norte, sobreyaciendo la toba San Carlos con la toba Santana. El material extrusionado en ambas calderas es predominantemente riolítico (SGM, 2000, 2003, 2008a, 2008b).

### 3. Marco Teórico

El agua, en todas sus presentaciones, es el líquido más importante para el desarrollo de los seres vivos. Las propiedades fisicoquímicas que posee le otorgan cualidades únicas que la vuelven un líquido irremplazable.

El análisis del agua superficial, hidrología superficial, se centra en el agua que escurre sobre la superficie, estudiando las variables que se involucran durante su viaje a través de los suelos y formaciones rocosas, incluyendo tiempo y frecuencia de su ocurrencia, distribución, movimiento, almacenamiento, calidad y cantidad (Singh, 2017).

Campos Aranda (1998) cita en su libro “Procesos del ciclo hidrológico” dos definiciones de **cuenca hidrográfica**: en la primera la define como la “*Totalidad del área drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces, tales que todo el escurrimiento originado en tal área es descargado a través de una única salida*”. Mientras que en la segunda como la define como el “*Área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios*”.

Una vez definido el término de cuenca, se puede determinar que consiste en la unidad base a partir de la cual se realizan cálculos para conocer el paso del agua y poder, de ser necesario, aprovechar el recurso al máximo, hasta evitar desastres naturales.

La **geomorfometría** es considerada la cuantificación de las geoformas. El análisis geomorfométrico de una cuenca se refiere a los procedimientos que se realizan para conocer la geometría de una cuenca y la relación existente entre el líquido y el material sólido a través del cual viaja. Los rasgos geomorfológicos que caracterizan una cuenca se deben a la acción de los agentes erosivos que actúan sobre el paisaje, especialmente el agua (Rodrigues da Cunha & Matheus Bacani, 2016; Soni et al., 2013; Sukristiyanti et al., 2018; Vincy et al., 2012).

El uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica, permite realizar el análisis de la cuenca de una forma más rápida y económica, al reducir de forma considerable los puntos físicos de observación (Rodrigues da Cunha & Matheus Bacani, 2016; Nag, S K, 1998; Sukristiyanti et al., 2018).



Los pioneros en el análisis de cuencas hidrológicas fueron Horton y Strahler, personajes a partir de cuyas investigaciones se desarrollan la gran mayoría de los parámetros que describen el comportamiento hidrológico de una cuenca y que se desarrollaron en la presente investigación (Singh, 2017).

Las variables por analizar son determinación del parteaguas, perímetro, área, coeficiente de compacidad o *Gravelius*, factor forma, relación de elongación, pendiente de la cuenca, orden de corriente, características del cauce principal, relación de bifurcación y densidad de drenaje.

Hasta hace algunos años, el cálculo de cada uno de estos parámetros implicaba realizar numerosas visitas a campo para conocer las características físicas del medio, pero con el desarrollo de sensores remotos y sistemas de información geográfica, las técnicas para su cálculo e interpretación se han simplificado, reduciendo tiempo y costos en las investigaciones que se llevan a cabo, además de permitir el acceso a zonas recónditas a través de imágenes satelitales y de esta manera generar información para beneficio del humano y protección del medio ambiente.

El análisis de una cuenca parte de la delimitación de esta. La línea imaginaria divisoria de cuencas es llamado **parteaguas**, y comúnmente se define con la ayuda de curvas topográficas y la dirección de flujo (Campos Aranda, 1998; Singh, 2017). El procedimiento comienza con la identificación del punto de salida de la cuenca, a partir de ese punto se dibuja la línea divisoria que corta las curvas topográficas en ángulo recto, avanzado hacia la cabecera de cuenca (Campos Aranda, 1998; Singh, 2017).

El parteaguas determina el **área** que ocupa la cuenca y el **perímetro** de esta, valores de gran importancia para evaluar los parámetros morfológicos de la cuenca que definen su forma y comportamiento. El tamaño de una cuenca se clasifica de acuerdo con Campos Aranda (1998), quien recaba información de diversos autores y simplifica los tamaños y su clasificación de la siguiente manera (Tabla 3):



**Tabla 3.** Clasificación para las cuencas, de acuerdo con su superficie, propuesta por Campos Aranda (1998).

Tamaño de la cuenca (km <sup>2</sup> )	Descripción
<2.5	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2,500	Intermedia-grande
2,500 a 5,000	Grande
>5,000	Muy grande

La morfología de la cuenca se describe con ayuda de una serie de coeficientes. El primero es planteado por *H. Gravelius*, se nombra **Coefficiente de Compacidad**, y relaciona el perímetro de la cuenca (P) y la circunferencia de un círculo de misma área que la cuenca (P<sub>c</sub>) (Ecuación 1).

$$C_c = \frac{P}{P_c} = 0.282 P / \sqrt{A} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Los valores obtenidos son adimensionales, la forma ideal (circular) se obtiene en la unidad y es el valor inferior, conforme aumenta este valor indica distorsión, asimetría o alargamiento (Campos Aranda, 1998).

Otro cociente que ayuda a identificar la forma de la cuenca es propuesto por Horton, definido como **factor forma** (R<sub>f</sub>), se calcula como al dividir el área de la cuenca sobre la longitud de la cuenca (L<sub>c</sub>) elevada al cuadrado (Ecuación 2).

$$R_f = A / L_b^2 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Cuando el resultado es cercano a la unidad se asume una cuenca redonda, idónea; si el valor se acerca a 0.6 se habla de una cuenca alargada (Campos Aranda, 1998; Singh, 2017).

La **relación de elongación** se calcula de forma similar al factor forma, y su resultado hace referencia a la pendiente del terreno, cuando el valor es cercano a 1, se tienen terrenos de pendiente suave, mientras el cociente se aleja de la unidad y se acerca a 0.6 se trata de pendientes fuertes y terrenos accidentados. El cálculo consiste en el cociente del diámetro (D) de un círculo de la misma área que la cuenca, sobre la longitud de la cuenca (L<sub>c</sub>) (Ecuación 3):

$$R_e = \frac{D}{L_c} = 1.1284 \sqrt{A} / L_c \quad \text{Ecuación 3.}$$

Además de describir la morfología de la cuenca, existen otra serie de procedimientos los cuales sirven como ayuda para determinar el carácter del escurrimiento de la cuenca.



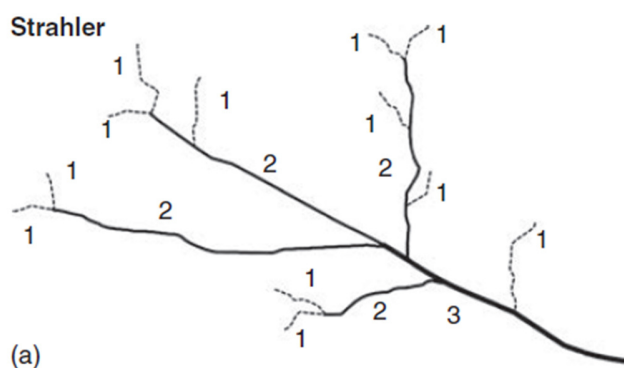
Se puede comenzar con la **densidad de drenaje**, que consiste en el cociente entre la sumatoria de las corrientes presentes en la cuenca (L) y el área total de la cuenca (A) (Ecuación 4):

$$D = \sum L/A \quad \text{Ecuación 4.}$$

Cuando la densidad de drenaje es alta se relaciona con probabilidad de grandes avenidas, ya que un mayor número de corrientes y menor fricción que se oponga a su flujo puede producir inundaciones aguas abajo. Este valor depende de la geología del lugar, el clima, duración de las tormentas y las actividades antropogénicas que pueden crear efectos en el uso de suelo original (Singh, 2017).

Para otorgar un número jerárquico a cada una de las corrientes de la cuenca se emplea el **orden de corriente**. Fue creado por Horton (1945) y posteriormente modificado por Strahler (1952, 1957).

A cada uno de los arroyos que se forman en las partes altas de la cuenca se les otorga el número 1, cuando dos escorrentías de orden 1 se unen se crea una corriente de orden 2, posteriormente, cuando dos arroyos orden 2 se unen se crea uno orden 3. Si un arroyo orden 1 se une a uno orden 3, se mantiene el mismo orden 3. Conforme se aumenta el número de orden, la cantidad de segmentos disminuye, hasta llegar a una sola corriente, cuyo orden es denominado “Orden Principal”, que se encuentra en la salida de la cuenca (Figura 7) (Singh, 2017):



**Figura 7.** Orden de corriente con el método de Strahler (modificado de Strahler, 1954, 1957) (Singh, 2017).

Para conocer el comportamiento de la cuenca en carácter hidrológico, se puede calcular la **relación de bifurcación** ( $R_b$ ), el valor obtenido varía usualmente entre 2 y 4, cuando la relación es pequeña, cercana a 2, se entiende que la cuenca presenta tendencia a





las inundaciones. Se determina como el cociente del número de segmentos de un orden dando, sobre el número de segmentos del orden superior inmediato (Ecuación 5):

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad \text{Ecuación 5.}$$

Estos parámetros fueron seleccionados para caracterizar hidrológica y geomorfométricamente a las cuencas, además de permitir la comparación entre ellas.



#### 4. Metodología

El análisis morfométrico de las cuencas en estudio comienza mucho antes del análisis de sus parámetros y resultados. Para comprender la importancia de su estudio y establecer objetivos coherentes, se realizó una extensiva búsqueda bibliográfica para comprender el escenario social, económico, natural y geológico, entre otros.

Una vez establecidas las bases de conocimiento general sobre el área, se procedió a la búsqueda de información técnica especializada, es decir, inputs que permitieran realizar el análisis morfométrico de las cuencas de interés.

Las fuentes de información que se eligieron para el desarrollo de la presente tesis fueron el portal web del *INEGI*, de donde se descargaron una serie de cartas topográficas en su versión *.shp*, y el portal *Alaska Satellite Facility*, donde dentro de sus *SAR Datasets* se encuentra *ALOS PALSAR*, que cuenta con archivos generados por sensores remotos que documentan la topografía de los sitios por los cuales pasan.

La validación de la información se realizó en el software *Arc GIS 10.3*, del cual se cuenta con licencia estudiantil.

Los archivos obtenidos del *INEGI* consisten en archivos vectoriales que contienen todos los rasgos que se pueden observar en una carta topográfica: curvas de nivel, escurrimientos de agua superficial, carreteras, localidades, construcciones, etc. Se trabajaron los diversos archivos que se emplearán en el análisis para validar que sean archivos coherentes, con continuidad y acertados.

La validación de *ALOS PALSAR* se desarrolló mediante la unión de las cartas y verificar que empataran una con otra, además de rellenar pixeles vacíos que se pudiesen encontrar en el archivo ráster.

Después de la revisión de información, se decidió trabajar con tres bases de datos: *INEGI* escala 1:50,000, *INEGI* 1:250,000 y *ALOS PALSAR* con resolución de píxel de 12.5 m. Al contar con alta definición, fue necesaria la unión de varias cartas, en la Tabla 4, se enumeran las claves de las cartas empleadas.



**Tabla 4.** Cartas empleadas para análisis geomorfométrico.

Base de datos	INEGI 1:50,000	INEGI 1:250,000	ALOS PALSAR
<b>Cartas empleadas</b>	H13D33	Continuo Chihuahua Continuo Coahuila	AP_22758_FDB_F0550_RT1
	H13D34		AP_22758_FDB_F0560_RT1
	H13D43		AP_22758_FDB_F0570_RT1
	H13D44		AP_22758_FDB_F0580_RT1
	H13D45		AP_22933_FDB_F0550_RT1
	H13D46		AP_22933_FDB_F0560_RT1
	H13D53		AP_22933_FDB_F0570_RT1
	H13D54		AP_22933_FDB_F0580_RT1
	H13D55		AP_23181_FDB_F0550_RT1
	H13D56		AP_23181_FDB_F0560_RT1
	H13D63		AP_23181_FDB_F0570_RT1
	H13D64		AP_23181_FDB_F0580_RT1
	H13D65		AP_23356_FDB_F0560_RT1
	H13D66		AP_23356_FDB_F0570_RT1
			AP_23356_FDB_F0580_RT1

Dentro del análisis geomorfométrico realizado, se emplearon tres escalas diferentes, 1:50,000 y 1:250,000, cuya fuente son cartas topográficas del INEGI; y el DEM de ALOS PALSAR con tamaño de píxel de 12.5 m. Para obtener un punto de comparación, se realizaron archivos ráster a partir de las curvas de nivel del INEGI para conocer el tamaño de píxel, en la escala 1:50,000 es 433.49 m, mientras en la escala 1:250,000 es 441.88 m.

Una vez unidas las cartas de cada una de las bases de datos se procedió con el análisis de las cuencas. Se partió de la característica principal y más importante: definir la cuenca.

El **trazo de la cuenca** se realizó con ayuda de la topografía y escorrentía(s). En este caso se emplearon las tres bases de datos para afinar el **parteaguas** de ambas cuencas. Se comenzó en la salida de la cuenca, teniendo en cuenta que el parteaguas corta de forma perpendicular las curvas topográficas y jamás intersecta corrientes, a excepción del punto de salida de la cuenca. Asimismo, debe de pasar por los puntos más altos topográficamente, cuando se dirige hacia puntos altos, debe de cortar las curvas por la parte convexa, mientras decrece en elevación, corta por la parte cóncava (Campos Aranda, 1998).

Una vez definido el parteaguas, se puede determinar el **área y perímetro de la cuenca**, realizado con la ayuda de la tabla de atributos de cada uno de los archivos vectoriales, se añadieron dos columnas, en una de ellas se calculó el área (en km<sup>2</sup>) con la herramienta *Calculate Geometry*, y en la otra se determinó el perímetro (en km).

Con estos parámetros se procedió al cálculo del **Coefficiente de Compacidad, Factor Forma y Relación de Elongación**, los cuáles se realizaron a través de operaciones



aritméticas simples, con la ayuda de las ecuaciones incluidas en esta tesis, dentro del Marco Teórico.

Para realizar el **análisis de escorrentía**, fue necesario contar con la red de drenaje de la cuenca. Para ejecutarla se empleó el apartado *Hydrology*, en *Spatial Analyst Tools*, dentro del *ArcToolbox*. Como archivo de entrada se empleó el archivo ráster (tipo TIF) de la cuenca, en el caso de la base de datos de ALOS PALSAR se encuentra en ese formato, así que se procedió a su análisis de forma directa. Como los datos del INEGI son capas vectoriales, fue necesario crear un archivo ráster a partir de las curvas de nivel.

Dentro de *Hydrology* se emplearon las herramientas *Flow Direction*, que nos indicaron la dirección de flujo de cada una de las pendientes de la cuenca; *Flow Accumulation* para descubrir las corrientes principales, donde la acumulación de agua es superior. Después se realizaron una serie de cálculos en *Map Algebra > Raster Calculator*, el primero consiste en *log10* para “exagerar” la red de drenaje y, que sea más fácil de visualizar, y posteriormente *Con*, donde se estableció una condicional para seleccionar la ramificación que se deseaba tener en el drenaje de la cuenca. Después de realizar estos pasos, se procedió a unir cada uno de los segmentos con la herramienta *Stream Link*, dentro de *Hydrology*, brindando continuidad a las corrientes.

El **orden de corriente** se determinó con la herramienta *Stream Order*, donde de forma automática, se otorgó un orden de corriente a cada uno de los segmentos de la red hídrica, y para obtener un archivo vectorial como resultado se empleó *Stream to Feature*.

Con estos datos calculados, fue posible realizar el análisis de las variables hidrológicas que se pueden determinar dentro de la geomorfometría. Por ejemplo, la **densidad de drenaje y relación de bifurcación**.

La **pendiente media de la cuenca** se obtuvo con la herramienta *Slope*, dentro de *Surface* en *Spatial Analyst Tools*, y para convertirlo se empleó *3D Analyst Tools > Functional Surface > Interpolate Shape*; para visualizarlo en tabla se regresó a *Spatial Analyst Tools*, dentro de *Zonal > Zonal Statistics as Table*.

Una vez calculados todos los parámetros, con las respectivas evidencias necesarias para su interpretación (mapas, tablas, figuras, etc.), se procedió al análisis de los resultados y posteriormente a la redacción de conclusiones y recomendaciones.



## **5. Discusión de Resultados**

El Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Santa Elena (APFFCSE) es considerada como un área de gran interés histórico, biológico y geológico, además de su importancia social y económica, al ser una región fronteriza con los EE. UU., y que desde 1994, es considerada como una zona federal protegida.

El análisis de disponibilidad de agua superficial y subterránea, en la cual se manifiesta la disponibilidad en los acuíferos, fueron realizados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se presume con base en datos antiguos y de forma indirecta, debido a la poca o nula disponibilidad de información en el área.

Con base en la investigación bibliográfica realizada sobre la zona de interés, y en la cual se tuvo la colaboración de los investigadores de las universidades norteamericanas y de las autoridades de la CONANP, se pudo concluir que si bien existían trabajos previos sobre la calidad del agua de las corrientes superficiales, no existía ningún tipo de estudio hidrológico o hidrogeológico previo que determinara las características principales y más importantes de los arroyos San Carlos y San Antonio, sustentándose de esta forma, el desarrollo de la presente investigación.

Resalta también la riqueza geológica de la zona, pues se puede encontrar una extensa columna estratigráfica en un área reducida, que varía desde basamentos antiguos, pasando por explícitos pliegues sedimentarios, hasta llegar a las manifestaciones ígneas recientes con sus majestuosas estructuras características, además de ser una zona de gran riqueza paleontológica, la cual está siendo estudiada por otro cuerpo Académico de la Facultad de Ingeniería.

Al analizar la información contenida dentro del Marco Físico, resulta obvio que las cuencas en estudio se localizan en una zona árida, con poca precipitación, lo cual dificulta aún más su análisis hidrogeológico, ya que no se cuentan con estaciones meteorológicas suficientes del lado mexicano en (o cercanas a) la zona de estudio para realizar un modelo climatológico detallado del área.

Durante el análisis y validación de los datos, opta por analizar únicamente la información INEGI 1:250,000 y ALOS PALSAR, para brindar variedad a la investigación con dos fuentes de datos diferentes y de escala contrastante.



Al momento de realizar el procesamiento y cálculos, fue posible observar varios detalles en los datos de entrada, como errores al empatar cartas, vacíos en los archivos ráster y/o falta de referencia espacial, muchos de ellos se solucionaron durante el manejo de los datos, de forma manual, requiriendo de tiempo y esfuerzo para corregir errores que pudieran suponer un resultado erróneo durante el procesamiento.

Los parámetros geomorfométricos obtenidos mediante el análisis de ambas cuencas de interés, se muestran en la Tabla 5, a continuación:

**Tabla 5.** Resultados del análisis geomorfométrico de las cuencas San Carlos y San Antonio.

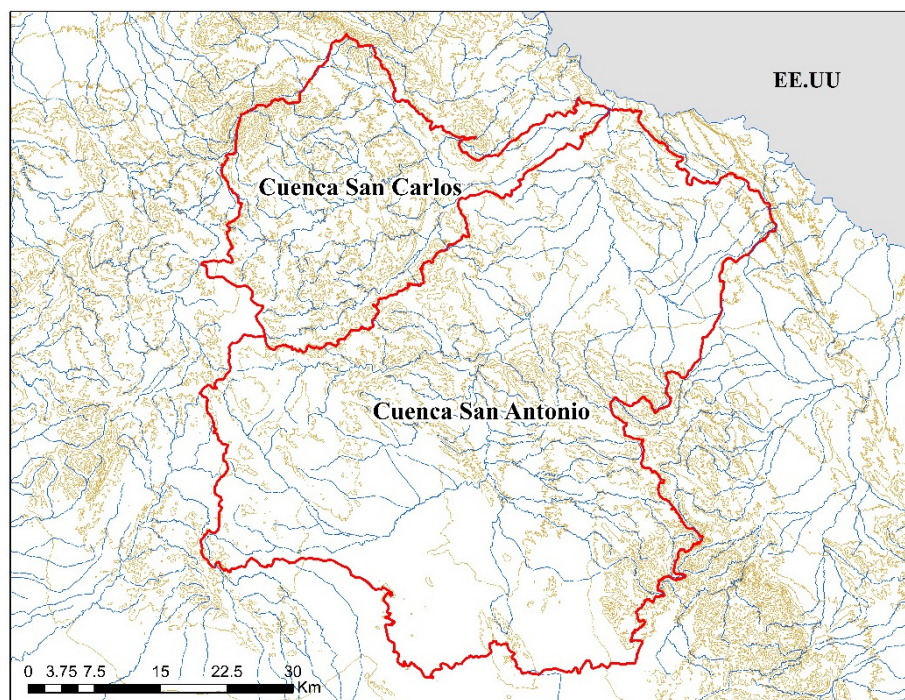
Parámetro	INEGI 1:250,000		DEM ALOS PALSAR		Porcentaje de variación	
	Cuenca		Cuenca			
	San Carlos	San Antonio	San Carlos	San Antonio	San Carlos	San Antonio
Área (km²)	724.468	2346.117	724.468	2346.117	-	-
Perímetro (km)	174.557	308.435	174.557	308.435	-	-
Tipo de vertiente	Exorreica	Exorreica	Exorreica	Exorreica	-	-
Longitud cauce principal (km)	65.84	106.67	62.95	108.85	4.43%	2.04%
Relación de bifurcación	3.5	4.37	3.48	4.1	0.57%	6.18%
Índice de pendiente media cuenca (%)	5.32	3.30	20.267	12.565	280.96%	280.76%
Coefficiente de compacidad	1.829	1.796	1.829	1.796	-	-
Factor forma	0.297	0.50	0.297	0.50	-	-
Relación de elongación	0.615	0.8	0.615	0.8	-	-
Densidad de drenaje (km/km²)	0.60	0.433	1.95	2.10	225%	385%
Orden de corriente	4	4	7	7	-	-

El **tamaño y perímetro de las cuencas** (Figura 7) es igual al emplear ambas bases de datos tanto INEGI como ALOS PALSAR. Se consideró a ambas como **cuencas exorreicas**, ya que vierten sus aguas al Río Bravo, mismo que desemboca en el Golfo de México, aguas abajo.

La primera diferencia entre la fuente de datos empleada resulta al determinar la **longitud del cauce principal**. El San Carlos se vuelve un par de kilómetros más extenso en los datos de INEGI, ya que sus rasgos vectoriales suelen presentar mayor sinuosidad en el trazo del arroyo, mientras la red que se obtiene del procesamiento de ALOS PALSAR brinda líneas rectas sin suavizar.



En el caso contrario, el arroyo San Antonio, se vuelve más extenso en el procesamiento de ALOS PALSAR. A pesar de mostrar, al igual que el San Carlos, más detalle en su trazo, hacia el cierre de la cuenca, en las porciones de menor pendiente, el trazo de INEGI se vuelve más recto, mientras el DEM de ALOS PALSAR muestra mayor sinuosidad, brindando un par de kilómetros extra en su longitud.

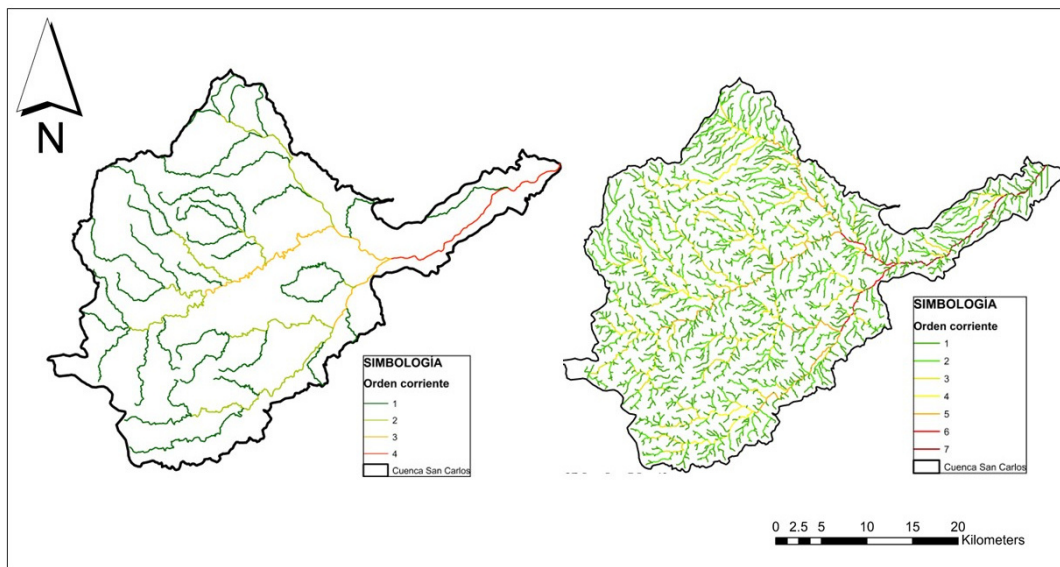


**Figura 8.** Delimitación de las cuencas San Carlos y San Antonio.

Al realizar el cálculo de **relación de bifurcación**, el cociente que se obtiene es mayor en ambas cuencas, con los datos obtenidos de INEGI 1:250,000. Mientras que al tomar en cuenta a la **pendiente**, esta se vuelve mucho más pronunciada al emplear el DEM ALOS PALSAR, pues cuenta con una resolución mayor que los datos de INEGI, debido a la escala empleada.

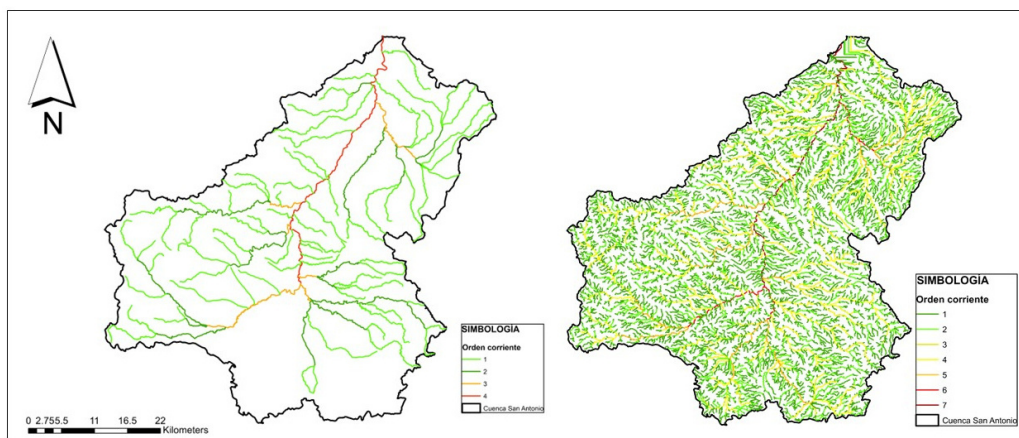
La mayor discrepancia en el uso de escalas tan diferentes ocurre al calcular la **densidad de drenaje** y el **orden de corriente**, pues el patrón se vuelve mucho más denso en ALOS PALSAR, mientras en INEGI se muestra una zona con escurrimiento escaso, como se puede observar en la *Figura 7*, que permite observar la diferencia en la densidad de drenaje y, por ende, del orden de corrientes para la cuenca San Carlos.





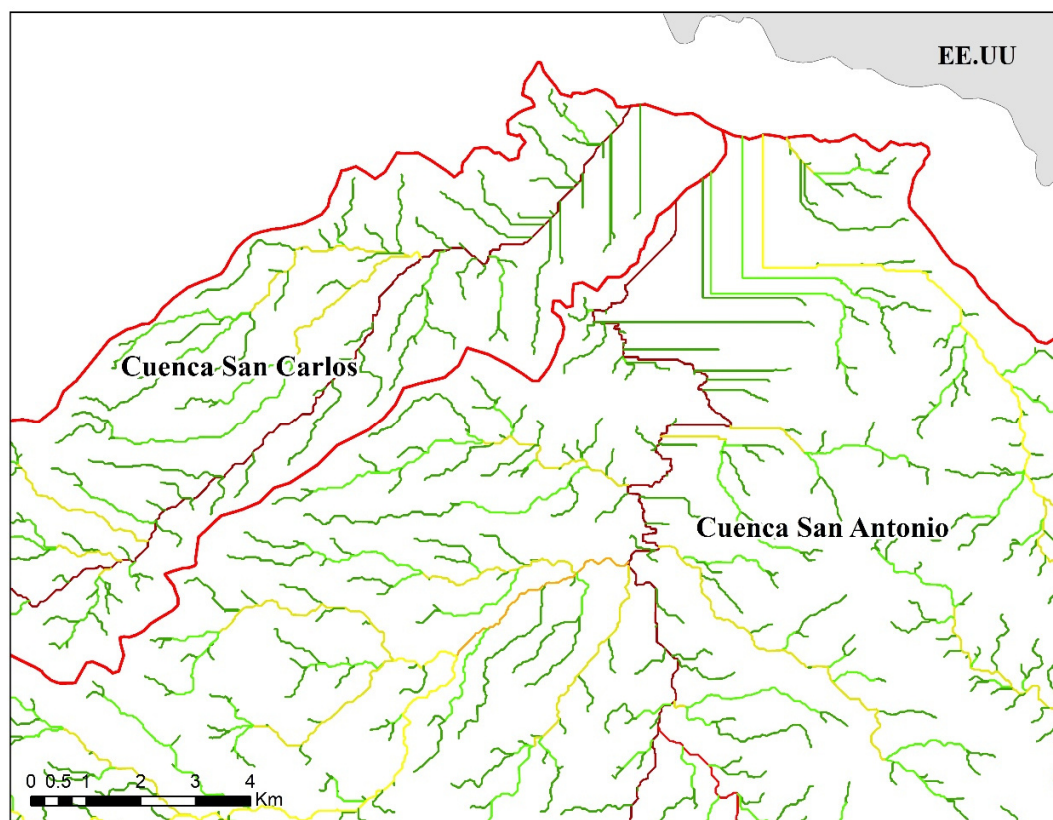
**Figura 7.** Orden de corriente en la cuenca San Carlos, INEGI 1:250,000 vs ALOS PALSAR.

La comparación en densidad de drenaje se elaboró de la misma manera en la cuenca San Antonio, en el extremo izquierdo de la Figura 8 se muestra la información obtenida con datos del INEGI, mientras en el lado derecho los obtenidos con el ráster de ALOS PALSAR.



**Figura 8.** Orden de corriente en la cuenca San Antonio, INEGI 1:250,000 vs ALOS PALSAR.

Además de las discrepancias en los cálculos dependiendo de la base de datos empleada, se puede observar de forma visual, hacia el cierre de las cuencas, que al emplear los archivos ráster de ALOS PALSAR, se crean líneas rectas debido a la monotonía en la pendiente en esa zona, perdiendo el cauce real de los arroyos (Figura 9).



**Figura 9.** Cierre de las cuencas San Carlos y San Antonio.



## **6. Conclusiones y Recomendaciones**

Las cuencas San Carlos y San Antonio tienen una gran relevancia en la conservación de flora y fauna endémica dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Santa Elena (AFPFFCSE), además de ser parte muy importante y contribuir a la riqueza geológica de la región.

Ambas se localizan en una zona desértica, binacional, aislada y además protegida, lo cual sin duda ha contribuido a la pobre cantidad de estudios publicados, y específicamente, donde los estudios hidrogeológicos son escasos, o en su defecto, inexistentes a una escala local.

Es sin duda una zona virgen que aun guarda una gran cantidad de información geológica, biológica que debe ser estudiada y contrastada con la abundante información con la que se cuenta en el país vecino. Además, que el crecimiento poblacional en la zona empieza ya a provocar incertidumbre con respecto a cómo buscar mejorar el nivel de vida de la población y al mismo tiempo seguir trabajando con la conservación de esta zona ecológica tan rica del desierto chihuahuense.

Es necesario comenzar entonces con el análisis de la zona desde el punto de vista hidrológico-hidrogeológico para abonar al manejo del AFPFFCSE, además de coadyuvar a la toma de decisiones a las instancias correspondientes, respecto al futuro manejo de los recursos hídricos en la zona.

Las cuencas de los arroyos San Carlos y San Antonio fueron propiamente delimitadas y estudiadas en esta tesis desde un punto de vista hidrológico superficial. Estas corrientes tienen como ya se explicó una gran relevancia en la zona, tanto para los habitantes de la frontera, que se benefician de su escorrentía para el desarrollo de sus actividades, como para las autoridades que administran y protegen el APFF Cañón de Santa Elena.

Desde una perspectiva geomorfométrica, ambas corrientes tienen cuencas de tamaño intermedio a grande y forma irregular y/o alargada. Debido a su carácter intermitente muestran poca tendencia a inundaciones extremas. Sin embargo, al ubicarse en una zona desértica, la posibilidad de una precipitación extraordinaria, que provocaría la crecida de ambas corrientes, si bien es pequeña, estadísticamente está presente y, debe ser considerada para proyectos de infraestructura o de desarrollo económico posteriores en la zona.



Es de gran relevancia, al momento de realizar futuras investigaciones *in situ*, el elegir la escala adecuada, a fin de realizar la cartografía base que sirva de referencia para vaciar la información que sea recabada (geológica, geofísica, geoquímica, etc.), ya que en la presente Tesis se muestran el uso de dos escalas contrastantes, una con mucho detalle y otra con escaso detalle.

En los resultados de ALOS PALSAR se observa una densidad de drenaje que se sabe es inexistente, debido a la precipitación escasa en la zona. Por otra parte, los resultados obtenidos con INEGI 1:250,000, brindan un mejor escenario del área de interés.

Es también de gran importancia mencionar que no se puede trabajar toda la extensión de las cuencas en la misma resolución, pues en zonas de pendiente suave, como el cierre de las cuencas, zonas arenosas que se unen al Río Bravo, se pierde gran parte del detalle y estas zonas representan áreas de gran interés, debido a su potencial de recarga para los acuíferos transfronterizos.

Se recomienda realizar un nuevo análisis de la zona, con información meteorológica actualizada, para determinar si la disponibilidad de los acuíferos y cuencas cuentan en realidad con disponibilidad. Un caso ideal sería la colocación de estaciones *in situ* que midan a detalle las condiciones climatológicas prevalecientes en la zona y ayuden a la creación de un modelo climatológico más preciso.

Es necesario además realizar un levantamiento topográfico, tradicional o quizás vía dron en la zona de la planicie de inundación del Río Bravo, pues los DEMs y fuentes digitales no son muy precisos. Asimismo, se debe mejorar la cartografía geológica en la zona, pues sin lo anterior, la interpretación hidrogeoquímica de la zona puede volverse aún más compleja. Sin embargo, la realización de estos trabajos se ven comprometidos por la presencia de actividades criminales en la zona que no permiten el volar drones a baja elevación.

Esta tesis es el primer resultado de la colaboración binacional e interinstitucional a fin de poder obtener un estudio sistematizado de la zona a fin de complementar los trabajos paleontológicos, biológicos y ecológicos ya realizados en la zona. El caracterizar las cuencas hidrológicas, y realizar estudios multidisciplinarios utilizando todas las herramientas tecnológicas disponibles, es una función indispensable a fin de otorgar bases a los tomadores de decisiones a fin de maximizar los recursos naturales y promover su conservación.



## 7. Referencias consultadas

- Cabrera, F., Narváez, G., Chávez, J. M., Hernández, R., Alcantara, J., & Filiberto, G. (1984). Exploración carbonífera en la Cuenca de Ojinaga, Chihuahua. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 41–61.
- Campos Aranda, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. In *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.
- Carabias Lillo, J., Quadri de la Torre, G., & De la Maza Elvira, J. (1997). *Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Santa Elena, México*. Instituto Nacional de Ecología.
- CDIMM. (1948). *Estudio de la Zona Uranífera de El Sotolar, Chihuahua*.
- CNEN. (1963). *Resultados analíticos*.
- CONAGUA. (2020a). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican*.
- CONAGUA. (2020b). *ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones Hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos*.
- Del Arenal, R. (1964). Estudio geológico para la localización de yacimientos de carbón en el área Ojinaga-San Carlos, Estado de Chihuahua-México. *Boletín de La Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, XVI(5), 121–142.
- DECRETO por el que se declara como área natural protegida, con el carácter de área de protección de flora y fauna, la región conocida como Cañón de Santa Elena, con una superficie de 277,209-72-12.5 hectáreas, municipios de Manuel Benavides y Ojinaga, Chih, (1994).
- García, E. (1973). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)* (Segunda ed). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gregory, J. L. (1981). *Volcanic stratigraphy and K-Ar ages of the Manuel Benavides area, Northeastern Chihuahua, Mexico, and correlations with the Trans-Pecos Texas Volcanic Province*.
- Gunderson, R., Cameron, K., & Cameron, M. (1986). Mid-Cenozoic high-K calc-alkalic and alkalic volcanism in eastern Chihuahua, Mexico: Geology and geochemistry of the Benavides-Pozos area. *Geological Society of America Bulletin*, 97, 737–753.
- Henry, C. D., & Price, J. G. (1984). Variations in Caldera Development in the Tertiary Volcanic Field of Trans-Pecos Texas. *Journal of Geophysical Research*, 89(B10), 8765–8786.
- INEGI. (2001). *Carta Fisiográfica Continuo Nacional Escala 1:1,000,000 Serie I*.
- INEGI. (2008a). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1,000,000. Unidades climáticas*.
- INEGI. (2008b). *Diccionario de uso de suelo y vegetación escala 1:250,000*.
- INEGI. (2015a). *Carta Topográfica Chihuahua Escala 1:250,000 Serie IV*.
- INEGI. (2015b). *Guía para la interpretación de cartografía: Uso de Suelo y Vegetación Escala 1:250,000 Serie V*.





- INEGI. (2017). *Diccionario de Datos Edafológicos, Escala 1:250,000. Versión 4.*
- INEGI. (2020a). *Carta topográfica del Estado de Chihuahua, Escala 1:250,000.*
- INEGI. (2020b). *Información topográfica H13-12 San Miguel 1:250,000 serie VI.*
- INEGI. (2020c). *Información topográfica H13-8 Manuel Ojinaga 1:250,000 serie VI.*
- INEGI. (2020d). *Información topográfica H13-9 Manuel Benavides 1:250,000 serie VI.*
- INEGI. (2021). *Carta de Uso de Suelo y Vegetación Continuo Nacional Escala 1:250,000 Serie VII.*
- Lugo Hubp, J., & Córdova, C. (1992). Racionalización geomorfológica de la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas - Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*, 25, 25–63. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46111992000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111992000200002&lng=es&tlng=es)
- McDowell, F. W., & Chuchla, R. J. (2010). Geology of the Manuel Benavides area, Chihuahua, Mexico - The westernmost part of the Trans-Pecos Texas volcanic field. *The Geological Society of America Map and Chart Series 99.*
- Miranda Magallanes, B. (2016). *Modelo Hidrogeoquímico de los arroyos San Carlos y San Antonio, Chihuahua, Mexico.*
- National Weather Service. (2022). *Climate.* Climate. <https://www.weather.gov/wrh/Climate?wfo=maf>
- Raisz, E. (1964). *Landforms of Mexico (Mapa escala 1:3,000,000).*
- Rodrigues da Cunha, E., & Matheus Bacani, V. (2016). Morphometric Characterization of a Watershed through SRTM Data and Geoprocessing Technique. *Journal of Geographic Information System*, 08(02), 238–247. <https://doi.org/10.4236/jgis.2016.82021>
- Rodríguez Perchez, S. (2017). *Análisis para la evaluación de calidad del agua en arroyos San Carlos y San Antonio en el municipio de Manuel Benavides, Chihuahua, México.*
- S K Nag. (1998). Morphometric Analysis Using Remote Sensing Techniques in the Chaka Sub-basin, Purulia District, West Bengala. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 26(1&2), 70–76.
- SEMARNAT, CONANP, & Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Santa Elena. (2013). *Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Cañón de Santa Elena.*
- Servicio Meteorológico Nacional. (n.d.). *Normales Climatológicas por Estado.* <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>
- SGM. (1996). *Carta Geológico-Minera Manuel Benavides H13-9 Escala 1:250,000.*
- SGM. (1997). *Carta Geológico-Minera Ojinaga H13-8 Escala 1:250,000.*
- SGM. (2000). *Carta geológico-minera Ciudad Delicias H13-11 escala 1:250,000.*
- SGM. (2003). *Carta geológico-minera Ojinaga H13-8 escala 1:250,000.*
- SGM. (2008a). *Carta geológico-minera Manuel Benavides H13-9 escala 1:250,000.*
- SGM. (2008b). *Carta geológico-minera San Miguel H13-12 escala 1:250,000.*
- Singh, V. P. (Ed.). (2017). *Handbook of Applied Hydrology* (Second edi).
- Soni, S. K., Tripathi, S., & Maurya, A. K. (2013). GIS Based Morphometric Characterizat on of Mini



Watershed - Rachhnar Nala of Anuppur District Madhya Pradesh. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research*, 3(3), 32–38.

Sukristiyanti, S., Maria, R., & Lestiana, H. (2018). Watershed-based Morphometric Analysis: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012028>

Ulery, A. L. (2005). Edaphology. In *Encyclopedia of Soils in the Environment* (pp. 419–425).

Vincy, M. V., Rajan, B., & Pradeepkumar, A. P. (2012). Geographic information system-based morphometric characterization of sub-watersheds of Meenachil river basin, Kottayam district, Kerala, India. *Geocarto International*, 27(8), 661–684. <https://doi.org/10.1080/10106049.2012.657694>