



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE PUEBLA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

***“IDENTIFICACION DEL REGIMEN DE DRENAJES EN LA CUENCA
DEL “ALTO ATOYAC” Y SUS ALTERACIONES POR EL CAMBIO EN
EL USO DEL SUELO DESDE EL NACIMIENTO DEL RÍO HASTA SAN
MARTÍN TEXMELUCAN PUEBLA, MÉXICO”.***

Enero 2022

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
*LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL***

PRESENTA

MAURA NAYELI VARELA APARICIO

**DIRECTOR DE TESIS: DRA. MARIA DE LOURDES SALDAÑA
BLANCO**

**ASESOR EXTERNO ICUAP: DR. JORGE ALEJANDRO TORRES
JARAMILLO**



AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo realizado en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por parte de la Facultad de Ingeniería Química en conjunto con el Instituto de Ciencias en el Departamento de Zeolitas a cargo del Dr. Jorge Alejandro Torres Jaramillo, le agradezco el apoyo, paciencia y transparencia por la cual rige sus valores profesionales y personales, me ha mostrado que el conocimiento se transmite, que rodearse de gente con ganas de crecer nos motiva a sobre salir, me presenté en el instituto para iniciar mi servicio social, fue tal mi gusto por la investigación que decidí quedarme para realizar mis prácticas profesionales, aquí aprendí hacer reaccionar cada una de mis aptitudes y habilidades, parte fundamental para el desarrollo y aprendizaje del presente proyecto fue el Maestro Gabriel Balderas Romero perteneciente al departamento de investigaciones arquitectónicas y urbanísticas DIAU- BUAP.

Agradezco al cuerpo académico de la Facultad que ahora se presentan como mis sinodales y mi directora de tesis, la cual siempre tuvo apertura a transmitir sus conocimientos motivándonos a crecer profesionalmente, con una actitud positiva y una puerta abierta en aquellos días donde parecía no comprender un tema.

Sobre todo, agradezco a mi familia, papá, mamá lo vamos logrando, gracias por siempre apoyarme y nunca dejarme, por presionarme en esos días donde parecía que no tenía ganas, mamá te agradezco tu constancia por forjarme con valores y sobre todo asumir mis responsabilidades has hecho de mí una gran mujer, papá desde pequeña quise seguir tus pasos, gracias por ser un maestro en mi vida, hermanos su acompañamiento ha sido relevante en esta misión, agradezco a dios por permitirme llegar aquí con mi familia completa.

Y a todos esos familiares y amigos que de alguna u otra forma me han apoyado para crecer y culminar esta etapa en mi vida, gracias.

Ingrese a un reactor y la reacción sucedió hoy estoy a un paso de la salida con ustedes a mi lado, el proceso es largo, pero continúo.

MAURA N. VARELA APARICIO

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.I La importancia de los cuerpos de agua en el mundo y su relación con el ser humano.....	1
I.II Los cuerpos de agua y su estrecha relación con el cambio climático.....	2
I.II.I Concepto de cuenca.....	4
I.II.II Panorama de la región hidrológica administrativa balsas.....	7
I.II.III Descripción de la cuenca del alto Atoyac.....	7
CAPITULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
II.I Antecedentes y datos generales del río Atoyac.....	9
II.II Diagnóstico de la cuenca del alto Atoyac.....	12
II.II.I Aspectos biofísicos de la cuenca del alto Atoyac.....	15
III.JUSTIFICACIÓN.....	17
IV. OBJETIVO GENERAL.....	18
IV.I Objetivos Específicos.....	18
IV.II Hipótesis.....	18
V. MARCO TEÓRICO.....	19
V.I Delimitación de la cuenca.....	19
V.II Evaluación del sitio.....	23
V.II.I. Parámetros de forma.....	24
V.II.II. Parámetros de relieve.....	25
V.II.III. Parámetros del Cause.....	25
V.II.IV. Parámetros de la Red de Drenaje.....	26
V.II.V. Patrones de drenaje.....	28
VI. MARCO METODOLÓGICO.....	31
VI.I. Identificación del tipo de drenaje y Cálculo de NDVI.....	31
VI.I. Imágenes del satélite LANDSAT.....	32
VI.II. Herramientas para el procesamiento de imágenes satelitales.....	33
VI.III. Procesamiento de imágenes LANDSAT.....	39
VI.IV. Procesamiento con Software QGIS.....	40
VI.V. CONDICIONES DEL SITIO.....	42
VII. DESARROLLO.....	44

VII.I Delimitación del Polígono de Estudio en la Cuenca.....	44
VII.II Identificación del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI)	45
VII.III. SIMULACIONES.....	46
VIII. Resultado de las simulaciones en QGIS.	51
VIII.I Simulación 1: Año de 1995.....	51
VIII.II. Simulación 2: Año del 2000.....	53
VIII.III. Simulación 3: Año de 2005.....	55
VIII. IV. Simulación 4: Año de 2010.	57
VIII.V. Simulación 5: Año de 2015.....	59
VIII.VI. Simulación 6: Año de 2020.....	61
VIII. VII. Simulación 7: Año de 2021.	63
VIX. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
X. CONCLUSIONES.....	73
X.I. BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Delimitación de subcuencas de la cuenca “Alto Atoyac”</i>	19
<i>Ilustración 2. Ejemplificación de cuenca hidrológica.</i>	24
<i>Ilustración 3. Representación del fundamento de NDVI, fuente: Earth Observing System 2021.</i>	32
<i>Ilustración 4. Ejemplificación de ingreso a GLCF, fuente: Plataforma didáctica.</i>	35
<i>Ilustración 5. Ejemplificación, búsqueda y descarga de imágenes satelitales.</i>	35
<i>Ilustración 6. Ejemplificación de navegación y búsqueda de información.</i>	36
<i>Ilustración 7. Ejemplificación del tipo de imagen que desea descargar.</i>	37
<i>Ilustración 8. Ejemplificación de archivos GEOTIFF</i>	38
<i>Ilustración 9. Nombramiento de archivos y carpetas de archivos GEOTIFF</i>	38
<i>Ilustración 10. Descompresión y verificación de imágenes satelitales.</i>	38
<i>Ilustración 11. Ejemplificación comando para imágenes satelitales en RASTER de documentos a QGIS.</i>	40
<i>Ilustración 12. Representación de la zona de influencia hidrológica de la cuenca alta.</i>	44
<i>Ilustración 13. Representación de imagen satelital procesada en QGIS.</i>	45
<i>Ilustración 14. Perfil de elevación del punto 1 al punto 2, medido en Google Earth.</i>	48
<i>Ilustración 15. Perfil de elevación del punto 2 al punto 3, medido en Google Earth.</i>	48
<i>Ilustración 16. Perfil de elevación del punto 3 al punto 4, medido en Google Earth.</i>	49
<i>Ilustración 17. Perfil de elevación del punto 1 al punto 4, medido en Google Earth.</i>	49
<i>Ilustración 18. Ejemplificación de superposición de imagen satelital y polígono de interés.</i>	50

ÍNDICE DE MAPAS.

<i>Mapa 1. Ubicación del sitio de interés.</i>	44
<i>Mapa 2. Puntos para establecer polígono de estudio, extraído de Google Earth.</i>	45
<i>Mapa 3. Cálculo de NDVI, año de 1995, realizado en QGIS.</i>	51
<i>Mapa 4. Cálculo de NDVI, año 2000 realizado en QGIS.</i>	53
<i>Mapa 5. Cálculo de NDVI, año 2005 realizado en QGIS.</i>	55
<i>Mapa 6. Cálculo de NDVI año 2010, realizado en QGIS.</i>	57
<i>Mapa 7. Cálculo de NDVI, año 2015 realizado en QGIS.</i>	59
<i>Mapa 8. Cálculo de NDVI, año 2020, realizado en QGIS.</i>	61
<i>Mapa 9. Cálculo de NDVI, año 2021 realizado en QGIS.</i>	63

ACRÓNIMOS

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación.

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

CENAPRED: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

GEI: Gases de Efecto Invernadero

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

LANDSAT: LAND- Tierra SAT- Satélite

GLOVIS: Global Visualization Viewer

UTM: Universal Transverse Mercator

GLCF: Global Land Cover Earth

GEOTIFF: Tagged Image File Format

QGIS: Sistema de Información Geográfica de Código Abierto.

USGS: United States Geological Survey

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

EE.UU: Estados Unidos de América del Norte

EOS: Earth Observing System

UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México

UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

GLOSARIO

Recurso hídrico: Definido por la UNESCO como cuerpos de agua disponibles en calidad y cantidad suficientes para satisfacer una demanda identificable.

Cuenca: Extensión de terreno poco profunda en un Valle cuyas aguas se vierten en un río, lago o mar.

Cauce: Es la concavidad del terreno por donde corre el curso de un río o cualquier corriente de agua.

Cuenca hidrográfica: Territorio drenado por un único sistema de drenaje natural es delimitada por un parteaguas, considera únicamente las aguas superficiales, constituida por tres partes fundamentales alta donde nace el río y se desplaza por una gran pendiente, parte media donde existe un equilibrio de material sólido llevado por la corriente del río y el material que sale, y la parte baja donde el material sólido es depositado en las llanuras aluviales del río, con una menor velocidad de cauce y una mayor concentración de material sólido.

Cuenca hidrológica: Territorio que considera la cuenca hidrográfica e incluye las aguas superficiales y subterráneas (acuíferos) que abastecen la zona.

Región hidrológica: Área del territorio conformada por varias cuencas hidrográficas, basadas en su morfología y orografía, establecidas con la finalidad de gestionar el recurso hídrico.

Parteaguas: Línea que divide la escorrentía de los cuerpos de agua se encuentra en los puntos de mayor elevación.

Drenaje Natural: Estructuras físicas naturales que facilitan el escurrimiento y evita el almacenamiento del agua en una sola zona, forma parte de la orografía de la cuenca hidrológica le da cauce y velocidad al cuerpo de agua que transita.

Red de drenaje: se refiere a las trayectorias o al arreglo que guardan entre sí, los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. Es otra característica importante en el estudio de una cuenca, ya que manifiesta la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante, es decir, la rapidez con que desaloja la cantidad de agua que recibe. La forma de drenaje proporciona también indicios de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca.

Acuífero: Formación geológica subterránea constituida por capas de rocas cuyos poros son capaz de almacenar y ceder agua.

IDENTIFICACION DEL REGIMEN DE DRENAJES EN LA CUENCA DEL “ALTO ATOYAC” Y SUS ALTERACIONES POR EL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO DESDE EL NACIMIENTO DEL RÍO HASTA SAN MARTÍN TEXMELUCAN PUEBLA, MÉXICO.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

I.1 La importancia de los cuerpos de agua en el mundo y su relación con el ser humano

Los ríos son considerados a nivel mundial cuerpos de agua que ayudan al desarrollo socioeconómico, son receptores del recurso hídrico de alto impacto para la supervivencia de los seres humanos y forman parte crucial de la adaptación al cambio climático¹. El agua es la fuente natural de vida de cualquier especie y su purificación representa una buena calidad de solvencia hídrica a nivel mundial, sin embargo, a medida que crece la población, se manifiesta una necesidad de conciliar las demandas comerciales del recurso hídrico que aportan los ríos, en conjunto con las necesidades poblacionales. Por ello, es importante visualizar los sistemas de saneamiento de aguas industriales y municipales, como un proceso de mejora para el ser humano, puesto que; para el desarrollo y bienestar social son vitales en la reducción de la carga mundial de enfermedades y una mejora de la salud pública¹.

La falta de una gestión segura en los servicios de agua potable y saneamiento han deteriorado su calidad a nivel mundial, 4.5 billones de personas carecen de servicios de saneamiento, entendiéndose como saneamiento, al suministro de instalaciones y servicios que permiten eliminar los contaminantes que afectan la calidad del agua sin riesgo a la población; estos sistemas construidos inadecuadamente, constituyen una causa importante de morbilidad en todo el mundo, ya que un 80% de las aguas residuales regresan al ecosistema sin ser tratadas². A nivel mundial, los cuerpos de agua contaminada y el saneamiento deficientes, se encuentra estrechamente relacionados con la transmisión de enfermedades como el cólera, la disentería, hepatitis A, fiebre tifoidea y la poliomielitis. Por ello, los servicios de agua y saneamiento insuficientes o gestionados de una forma inapropiada, exponen a la población a riesgos para su salud, se calcula que 842,000 personas mueren cada año de diarrea como consecuencia de la insalubridad de los cuerpos de aguas de los cuales se proveen las poblaciones, la mejora en la calidad de las fuentes de abastecimiento de agua es de gran relevancia, pues conlleva a una reducción del gasto sanitario, ya que la población tiene menos probabilidad de enfermar y recurrir a gastos médicos, a la par de incrementar sustancialmente la capacidad productiva de la población².

Frecuentemente se ha subrayado que el recurso hídrico tiene funciones potencialmente valiosas, por lo cual, se ha permitido su creciente sobre explotación y su degradación, en este sentido, el agua es un recurso natural de acceso al público presente en toda clase de mercado, y aun, siendo utilizada como mercancía, los precios de mercado no son disponibles o varían según el sitio de explotación. Aunque algunas prácticas de sobreexplotación o contaminación del recurso pudieron haber sido en el mejor interés de la sociedad, en muchos casos, el recurso se ha perdido en actividades con beneficios limitados, y en ocasiones aún con costos para la sociedad (Turner et al 2004). Las causas de esta ineficiencia son institucionales y de mercado, pues impiden hacer un uso sustentable del recurso. Las fallas institucionales se presentan cuando éstas inducen o favorecen decisiones que llevan a la sociedad a alejarse, o la limitan para alcanzar la distribución socialmente óptima del recurso³ (OCDE 1994).

Las fuentes de fallas institucionales incluyen decisiones administrativas y políticas, derivadas de falta de información o de la insuficiente comprensión de la multitud de valores asociados al recurso del agua. Por su parte, una falla de mercado se presenta cuando no existe la posibilidad de llevar el agua a procesos económicos que guíen hacia el óptimo social. La falla de mercado ocurre cuando la falta de mercado, por externalidades y bienes públicos, restringe a las operaciones de mercado, a las instituciones o a las regulaciones necesarias (OCDE 1994).⁴

I.II Los cuerpos de agua y su estrecha relación con el cambio climático

Desde hace más de 100 años, después de la revolución industrial, se ha dado un proceso acelerado de pérdida de bosques y vegetación en regiones muy amplias del planeta, en México, se calcula que se ha perdido por lo menos la mitad de bosque desde la época colonial hasta nuestros días⁵. Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), nuestro país ha talado 6.3 millones de hectáreas de sus bosques, ocupando el segundo lugar en América Latina en destrucción forestal. La combinación de los procesos industriales adjunto con el problema de deforestación por expansión demográfica ha generado cambios en el clima planetario, un desgaste de nuestro recurso hídrico y una excesiva contaminación a la atmósfera y mantos freáticos⁵.

El cambio climático también juega un papel importante, pues agrava el problema de escasez de agua potable, adjunto al constante crecimiento poblacional, los cambios demográficos y la urbanización sin control, hacen necesaria la reutilización de aguas residuales para diferentes sectores, como lo es el agrícola, energético y en muchos casos, sectores de la población que se ven en la necesidad de abastecerse de agua de los ríos, sin tener el conocimiento previo de su calidad⁶.

Un sector ampliamente vulnerable ha sido el agrícola, la Asociación de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), considera la problemática de la calidad del agua, como un riesgo para la producción de alimentos, por ello en su proyección hacia el año 2050, se busca producir más alimentos con menor cantidad de agua, sobre todo con la tecnificación en la agricultura de riego, ya que juega un papel clave en la producción de alimentos de buena calidad, y sin apartarse de su vulnerabilidad al cambio climático, la FAO considera una gestión racional del agua para aumentar la resiliencia de la sociedad contra los fenómenos meteorológicos extremos, que se han vuelto cada vez más frecuentes, debido al calentamiento global derivado de la concentración excesiva de los GEI(Gases de Efecto Invernadero), que afectan directamente al sector agrícola⁷.

Por otro lado, la FAO considera a la escasez, calidad y el saneamiento inadecuado del agua, como una afectación severa a la seguridad alimentaria, a la nutrición y las oportunidades educativas y económicas para las familias pobres de todo el mundo⁷. Entre las estrategias mexicanas de cambio climático, tendientes a reducir la vulnerabilidad, se busca impulsar la gestión territorial integral, considerando un manejo y aprovechamiento sustentable, la protección, conservación y restauración de los ecosistemas urbanos, haciendo énfasis en regiones de alta vulnerabilidad en sus cuencas hidrológicas⁸.

El agua, siendo un recurso natural fundamental para la vida, la salud de la población, la producción de alimentos y la generación de energía en México, es un elemento clave que habilita el desarrollo económico, sin embargo, existen obstáculos relacionados a la política hídrica, siendo los principales la demanda hídrica, y los impactos del cambio climático que agravan la distribución inequitativa del recurso, a la par de la mala calidad del agua, esto se ve reflejada en la reducción de su utilidad poniendo en riesgo la salud poblacional y la calidad del ambiente. Por otra parte, en distintos estados de la república, la demanda excede su disponibilidad generando conflictos sociales como es el caso del norte del país. La competencia por el agua superficial y subterránea va en crecimiento y las alternativas de solución como la desalinización, tratamiento de aguas y su reutilización, implican retos a la normatividad aplicada, la seguridad hídrica tiene implicaciones económicas, sociales y ambientales, las zonas rurales limitan su acceso al agua y algunas zonas urbanas marginadas viven el mismo panorama, por ello, la gestión integral de los recursos hídricos, deben orientarse en beneficio de la población y el medio ambiente. Esto requiere una visión que concilie el desarrollo social y económico, donde se vea favorecida la sostenibilidad ambiental, estableciendo distribuciones hídricas equitativas entre sus usos y usuarios⁹.

En el balance hídrico Nacional del 2017, se tuvo un volumen anual promedio de 1,449 km³ de agua proveniente de la precipitación, de los cuales, el 70 % regresa a la atmósfera por evapotranspiración. Considerando que el país recibe aproximadamente 48 km³ por importación de las fronteras norte y sur y exporta 0.43

km³ anualmente del río Bravo a Estados Unidos, la disponibilidad media anual del país es de 451.6 km³; de este volumen, alrededor del 80% corresponde al escurrimiento superficial nacional, que es de aproximadamente 359.04 km³ y el otro 20% restante, contribuye a la recarga de los acuíferos. La región hidrológica administrativa del río Balsas en 2017 contaba con 21,668 (hm³/año) de agua renovable y un escurrimiento natural medio superficial total de 16.798 (hm³/año), su porcentaje de escurrimiento natural fue del 4.7%¹⁰.

El agua siendo un recurso natural clave para el desarrollo económico, se ve asociado a las grandes inversiones industriales y por lo tanto se ve impactada tanto por el desarrollo industrial como el desarrollo social, el agua almacenada en los acuíferos y cuerpos de agua superficiales, definida como agua azul, son las primeras fuentes utilizadas y acaparadas tanto por la industria como por la población, mientras que las zonas de agricultura utilizan aguas verdes (agua de lluvia) y agua azul para su riego. Existe un vínculo entre la escasez hídrica y la seguridad alimentaria, ya que se considera que la agricultura de riego es el mayor consumidor de agua azul con cerca del 69% de las extracciones anuales globales y el 92% del consumo. Ante esta situación es importante optimizar el uso de las aguas destinadas para abastecer a la población, ya que el crecimiento demográfico conlleva un déficit de agua, tanto para la industria alimentaria como para su uso doméstico. En México 1 de cada 10 habitantes no accede a infraestructura básica de agua potable, 4 de cada 10 personas no acceden a un servicio diario de agua potable, y el 50% de las aguas residuales no son tratadas, aunado a esto, 105 acuíferos del país están en situación de sobre explotación¹¹.

I.II.I Concepto de cuenca

Se define como cuenca, a la unidad del territorio en donde funciona la combinación de un subsistema hídrico que produce agua, simultáneamente con los subsistemas ecológico, económico, social y político. Las cuencas son elementos fundamentales de gran aporte para la obtención del recurso hídrico, son una fuente de abastecimiento continuo de agua dulce para atender las necesidades de la población, el proceso natural que se produce en una cuenca, a través de la interacción entre el agua, suelo, clima y vegetación, favorecen la captación de agua a través de ellas, además de forma natural restablece la calidad del agua vertida en ellas. Otros fundamentos importantes son la regulación de la cantidad de agua, la regulación climática y la evapotranspiración, que en conjunto funcionan como un estabilizador para el sistema de captación de agua y su aprovechamiento¹².

Las cuencas pueden dividirse en hidrográficas e hidrológicas; siendo las cuencas hidrográficas las contextualizadas al sistema geográfico superficial por el que circula el agua, se distingue por lo general tres sectores principales: Alto, Medio y Bajo,

estando estos determinados por las características topográficas. Las cuencas hidrológicas son cavidades naturales en las que se acumula agua de lluvia, esta circula hacia una corriente principal y finalmente llega a un punto común de salida, por lo que una región hidrológica se encuentra conformada por varias cuencas hidrológicas¹³.

Para delimitar una cuenca se considera una línea divisora a la que se le denomina parteaguas, esta línea se encuentra en las partes más altas de la orografía, en este punto de división de las corrientes, se establece la red de drenaje del cauce principal, es decir, todas las corrientes que caen en la misma cuenca.

Los drenajes naturales de una cuenca son estructuras físicas que facilitan el escurrimiento y evita el almacenamiento del agua en una sola zona. La morfometría de cuenca constituye una importante herramienta para evaluar el funcionamiento del sistema hidrológico de una región, de tal manera, que se pueda contribuir al manejo y gestión de los recursos naturales, este tipo de estudios morfométricos de las cuencas se basan en los tipos de drenaje que puedan existir en la cuenca. Para el estudio de los drenajes naturales, se requiere el uso de variables morfométricas que sean de medición directa y nos ayuden a analizar de una manera sistemática, el comportamiento de la cuenca y sus drenajes, algunas de las variables son:

1. **Perímetro (Km):** De acuerdo con la dimensión de la línea que limita la cuenca hidrográfica, a lo largo de la divisoria topográfica de aguas.
2. **Longitud axial (La) (Km):** Es la distancia entre la desembocadura y el punto más lejano de la línea divisoria de aguas de la cuenca, y está dada como la longitud de la línea recta que conecta a los puntos extremos de cuenca, en forma aproximadamente paralela al curso principal.
3. **Longitud del curso principal (L) (km):** Es la distancia medida desde el punto más distante del curso colector (el de mayor orden) de la cuenca hasta la desembocadura.
4. **Longitud total del drenaje (Ln) (km):** Es la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en una cuenca determinada.
5. **Ancho promedio (Ap) (km):** Es la relación entre la superficie de la cuenca (A) y la Longitud axial (La).
6. **Área de cuenca (A) (km²):** Es el parámetro que tiene estrecha relación con el caudal de descarga.

Todas las variables que permiten caracterizar cualitativa y cuantitativamente a las cuencas se agrupan en parámetros de forma, de relieve y de la red de drenaje¹⁴.

En México las regiones hidrológicas fueron una categoría elaborada en los años 60 del siglo XX, por la entonces Dirección de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, con la finalidad de clasificar la información hidrológica del país. La

información recopilada entonces, dividió al territorio nacional en 37 regiones hidrológicas delimitadas por los llamados “parteaguas”. Estas regiones quedaron asentadas en el Plan Nacional Hidráulico de 1975 y se definieron como áreas territoriales que presentan niveles de escurrimiento superficial y características orográficas e hidrológicas similares. Por meros motivos organizativos, las 37 regiones hidrológicas fueron divididas en 1,471 cuencas hidrográficas, estas cuencas incluyen ecosistemas terrestres y acuáticos, sus límites se establecen por el parteaguas desde donde escurre el agua que se precipita en el territorio delimitado en los puntos de salida del agua superficial¹⁵.

Aualmente México recibe un aproximado de 1, 400,000 millones de m³ de agua en forma de precipitación, de la cual se estima que el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmosfera, el 21.2% escurre por ríos o arroyos y el 6.3% se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Sin embargo, los impactos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico generan daños sociales que se ven reflejados en la escasez o el incremento de precipitación en determinadas épocas del año, generando inundaciones o deslaves, principalmente a las poblaciones que viven cerca de barrancas o del cauce de los ríos (Asociación Mexicana de Hidráulica 2020). Por ello un reto dentro de la seguridad hídrica, es el deterioro ambiental de las cuencas y acuíferos, algunos de los factores desencadenantes son la demografía, vista desde el crecimiento poblacional, la urbanización y el crecimiento económico; si bien la cantidad del agua no cambia, al existir estos factores se reduce la cantidad de agua que le puede tocar a cada habitante; en México el agua renovable por habitante es de 3,692 m³ y se estima que para el 2030 sea de 3,250 m³; esto significa que existiendo una mayor demanda del recurso hídrico, tanto para el sector económico como para el sector poblacional, también existirá un mayor uso del agua y por lo tanto un elevado índice de contaminación de ella, generando un estrés hídrico, el cual ya comenzamos a observar en diversos estados de la república, donde el cambio climático juega un papel importante que denota eventos extremos en sequías y precipitación, siendo afectando principalmente a la población. (Centro Virtual de información del Agua 2017)¹⁶.

México tiene una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud, donde destacan 51 ríos principales, por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie nacional, por superficie destacan las cuencas del río Bravo y el río Balsas y por longitud destacan los ríos Bravo y el río Grijalva -Usumacinta¹⁷.

Las cantidades de agua que consumen los diferentes sectores difieren entre las regiones debido a sus características ambientales, socioeconómicas y poblacionales, por ello la agricultura, con excepción de Europa, es el sector consumidor de agua a nivel mundial (FAO, 2018). En México, la CONAGUA clasifica

a los consumidores de agua en tres sectores: agrícola, abastecimiento público e industrial, en 2017 se concesionaron 66.8 km³ al sector agrícola (el 76.3% del total concesionado), 12.6 km³ al abastecimiento público (14.4%) y 8.5 km³ a la industria en general. A nivel de regiones hidrológicas administrativas, el 53.7%, (47,209 hm³) del volumen total concesionado en 2017, correspondió únicamente a cuatro regiones, entre las que se encuentra la Región IV Balsas con un volumen concesionado de 10, 874 hm³, con un mayor porcentaje a aguas superficiales en toda la región y en su mayoría son aguas para giro industrial¹⁸.

I.II.II Panorama de la región hidrológica administrativa balsas

La región hidrológica del Balsas IV comprende ocho entidades federativas: Morelos (completo), Tlaxcala, Puebla, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, México y Jalisco, tiene una superficie administrativa de 116,014 km², equivalente al 5.9% del territorio nacional, tiene un total de 171 aprovechamientos superficiales distribuidos en 15 cuencas hidrográficas. La región se encuentra limitada por Sierra Madre del Sur y la de Juárez, así como por el eje Neovolcánico; tiene la forma de una depresión muy alargada con valles muy angostos. La mayor parte de la región está formada por pendientes pronunciadas, por lo que geológicamente es poco propicia para el control y almacenamiento de los escurrimientos de la región (DOF 2011: 18). Está habitada por alrededor de diez millones de personas, cada una de ellas tiene una disponibilidad media del recurso de 2,062 m³. La región hidrológica del Balsas está dividida en subregiones; Alto, Medio y Bajo Balsas, el Valle de Puebla- Tlaxcala se encuentra dentro del Alto Balsas; en la RH IV del Balsas, se concentra cerca del 10% de la población total de la república mexicana, mientras que en el Alto Balsas se concentra el 71% de la población de toda la región¹⁹.

I.II.III Descripción de la cuenca del alto Atoyac

La cuenca hidrológica del Alto Atoyac inicia en los escurrimientos del Iztaccíhuatl y finaliza en la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo), tiene una superficie de aportación de 4,011.0 km², y se encuentra delimitada por las siguientes regiones y cuencas hidrológicas: al norte por la región hidrológica Panuco (26), al este por la cuenca hidrológica Libres-Oriental, mientras que la cuenca Hidrológica Baja del río Atoyac se delimita al norte por las cuencas hidrológicas río Nexapa, río Alto Atoyac y río Libres-Oriental, al sur por la región hidrológica número 20 Costa Chica de Guerrero, al oeste por las cuencas hidrológicas río medio Balsas y río Amacuzac, y al este por las cuencas hidrológicas río Tlapaneco y río Mixteco, aporta una

superficie de 12,222.35 km² y comprende desde la presa Manuel Ávila Camacho hasta la estación hidrométrica San Juan Tetelcingo²⁰.

El río Atoyac y el río Zahuapan tienen una forma de triángulo invertido, las zonas ubicadas a mayor altitud se encuentran en la base de este, cuya altitud está entre los 2,320 msnm, la cuenca Atoyac-Zahuapan se inicia a los 2,240 msnm y decrece en dirección sursureste hasta los 2,100 msnm, siendo aquí el vértice del triángulo, se tienen como antecedentes que esta zona es una planicie aluvial y dio surgimiento y existencia a la agricultura de riego, que años más tarde se convirtió en la zona industrial más importante entre Puebla y Tlaxcala²¹.

En el último ejercicio de cálculo de la población (2015), se estimó que la población de nuestro país era de 119.5 millones de habitantes, a la par y con base en los datos de la encuesta intercensal del INEGI, se definieron 74 zonas metropolitanas, entendiéndose como zona metropolitana al conjunto de dos o más municipios adyacentes a una ciudad de 50 mil o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades tiene influencia directa con ellos, manteniendo un alto grado de integración socioeconómica, este proceso de concentración de habitantes en las localidades urbanas, ha creado fuertes presiones sobre el ambiente por el incremento de la demanda de servicios²².

En 2017, en 15 zonas metropolitanas, con una población mayor a un millón de habitantes, se concentraba el 40.62% de la población del país; es decir, 50.18 millones de habitantes, adjunto a sus condiciones sociodemográficas, el índice de rezago social y la medición de la pobreza multidimensional en México, se estimó que 53.30 millones de personas, se encontraban en situación de pobreza, es decir el 43.9% de la población total²³.

Este crecimiento poblacional, ha generado una sobre explotación de acuíferos, en 2017 se tuvieron 105 acuíferos en estas condiciones, entre ellos el acuífero Valle de Tecamachalco en el estado de Puebla. La cuenca hidrológica alta del río Atoyac y la cuenca hidrológica del bajo Atoyac en 2017 registraron un déficit de solvencia hídrica²⁴.

La cuenca del Alto Atoyac divide la superficie entre los estados de Puebla, al que le corresponde 2,010 km² extendiéndose por 22 municipios, y el estado de Tlaxcala con 2,001 km² que cruza a 48 de sus municipios, todos estos hacen uso de estos cuerpos de agua y por lo tanto, son contaminantes inmediatos de la cuenca, los principales ríos del "Alto Atoyac" son el río Alseseca y el río Atoyac, la cuenca tiene una captación de agua del 24% proveniente del Volcán Popocatepetl e Iztaccíhuatl y un 6% proviene del volcán Malinche²⁵.

CAPITULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

II.I Antecedentes y datos generales del río Atoyac

Históricamente, el río Atoyac ha representado un factor importante para el desarrollo social y económico de las poblaciones que se asentaron alrededor de su área de influencia y en sus márgenes, en los años 60's, bajo el concepto de política nacional denominado, "desarrollo estabilizador", se orientó al país a una industrialización, lo que causó un impacto social en la zona centro del país dando así, en el estado de Puebla, un gran impulso al desarrollo industrial, sustentado este en su gran capacidad hidrológica, para la década de 1970, el deterioro del río era causado principalmente, por los desechos vertidos por las industrias textiles que se instalaron en la parte noroeste del Valle entre Puebla y Tlaxcala, para el año de 1989 se tenían específicamente en Puebla cerca de 384 fábricas textiles; años más tarde la contaminación se intensificó y se hizo más perceptible a partir de la instalación en el municipio de San Martín Texmelucan del complejo petroquímico Independencia, para los años 90's, con el establecimiento de corredores industriales que realizaban y realizan hasta la fecha descargas de aguas residuales sin tratamiento a drenajes municipales, o directamente a las corrientes del río, causan olores penetrantes y fétidos, se presentan coloraciones diversas, que en conjunto han causado la pérdida de la biodiversidad. Todo esto en su conjunto son índices visibles del problema de degradación ambiental que sufre la cuenca hidrográfica del río Atoyac. La globalización de la economía, la política pública, los avances tecnológicos y la comunicación, han hecho evidente que los problemas ecológicos provocados por la expansión demográfica han generado la degradación ambiental, la cual repercute en la población con altos índices de marginación y pobreza, ya que dentro de una sociedad industrializada, como es el caso de las zonas industriales que se localizan en la cuenca del Alto Atoyac, la degradación de las condiciones biofísicas debido a la sobreexplotación del agua, esto se ha convertido en un componente social y no solo natural, por lo que los problemas ambientales son parte del ser humano, de su forma de vida y de su ordenamiento económico, político y cultura. Es importante reconocer que los procesos ecológicos o biofísicos de un ecosistema no son estables, pues el medio se expone mediante procesos naturales a la disminución de recursos. Con el fin de que el recurso hídrico sea bien administrado es importante considerar y visualizar al río Atoyac en una relación estrecha entre economía, naturaleza y desarrollo, con el único fin de crear un ambiente sustentable que beneficie a todos los sectores, pues un río limpio genera un incremento de la actividad económica y una buena economía moviliza a una buena sociedad²⁶.

Según datos del Censo de Población y Vivienda en el año 2010 del Estado de Puebla era de 5, 779,829 personas de las cuales el 52.1 % eran mujeres, y el 72% de la población se encontraba en áreas urbanas, desde éste mismo año, Puebla ya aparecía entre los 5 Estados que concentraban mayor población a nivel nacional y sus principales sectores económicos eran la industria automotriz, autopartes, química, plásticos, textiles e industrias alimentarias²⁷. En el último censo realizado 2020 Puebla mantuvo el 5to lugar como estado que concentra mayor población, con un total de 6, 583, 278 habitantes de los cuales el 52% son mujeres y un 48% masculinos, con una población de edad media de 28 años, 4 años más respecto al 2010 y una diferencia poblacional de 803, 449 habitantes (INEGI 2021).

La contaminación del agua en el curso del río Atoyac, fue primero un problema debido al incremento de la materia orgánica presente, derivada esta de los efluentes urbanos, sin embargo, el desarrollo industrial aportó nuevos contaminantes químicos, algunos difícilmente biodegradables, lo que dio comienzo a la eliminación de la vida del río. El municipio de Santa Rita Tlahuapan, que es la primera localidad de la cuenca alta del Atoyac del estado de Puebla, al incrementar tanto su población como las actividades industriales y de servicios, y descargar sin tratamiento alguno a tributarios del Atoyac, causa que dichas aguas lleguen al municipio de San Martín Texmelucan contaminadas, iniciando así el deterioro en la calidad del recurso hídrico que afecta a más de 2 millones de pobladores de los 22 municipios de Puebla que hacen uso del agua²⁸.

El 65% de la superficie de la región de San Martín Texmelucan, es dedicada a la producción agrícola de riego, siendo las principales fuentes de abastecimiento de agua las corrientes superficiales del río Atoyac, en un estudio realizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 800 productores utilizaban aguas residuales urbanas e industriales para regar sus cultivos; siendo estos productos los que abastecen a esta misma zona y los municipios aledaños a la región²⁹.

En este mismo municipio la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través del programa de apoyo al desarrollo hidráulico de los estados de Puebla, Oaxaca y Tlaxcala realizó un análisis estadístico, para el cual se encuestaron 98 hogares de la cabecera municipal, donde los encuestados fueron en su mayoría mujeres con escolaridad promedio de nivel secundaria, y la edad promedio fue de 47 años. Los resultados más significativos fueron los siguientes; 97.95% de la población cuenta con agua entubada y el 6.18% manifestó que la calidad de su agua es mala y el 1.03% es pésima, los principales problemas de calidad que se manifestaron fue el olor con un 34.14% de toda la población encuestada, la presencia de residuos el 39.02%, y el 58.53% su problema principal fue el sabor del agua que utilizan. En el reporte se informa que la cabecera municipal de San Martín

Texmelucan se abastece de agua potable a través de 5 pozos profundos, sin embargo, respecto a las conductas y actitudes de la población para ahorrar el agua, debido a que gozan de un servicio continuo, no acostumbran a implementar acciones para su cuidado, aquí se revela la falta de educación y responsabilidad social para la conservación del recurso hídrico³⁰.

El aumento poblacional se identifica como una de las principales causas del deterioro del río Atoyac, la sobre explotación del agua es resultado directo de procesos antropogénicos como lo han sido el uso irracional del recurso hídrico, el acaparamiento y el mal tratamiento del agua por parte de las industrias; pues el agua ha sido una riqueza natural para el desarrollo económico industrial. En el año 2013 el río Atoyac fue catalogado a nivel nacional como “altamente contaminado” y según datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), desde 2011 se posicionó como el tercer río más contaminado del país, por consiguiente, sus acuíferos se encuentran en condiciones de sobreexplotación. La subcuenca del río Atoyac tiene un uso de suelo principalmente agrícola (63.6%), seguida de una superficie relativamente baja de bosque (22 %) y de pastizal (4.95%), por último, la zona urbana ocupada el 7.6 %³¹. El clima que se presenta a lo largo de la subcuenca del río Atoyac es de un predominio del 78.3% templado subhúmedo con lluvias en verano, en segundo lugar, en las porciones altas con un 21.4% se encuentra un clima semifrío subhúmedo y una pequeña zona 0.26% de clima frío. En la región se presenta una baja precipitación anual de 812 mm, y una importante evaporación media anual de 1,427.00 mm, provocando que el volumen escurrido resultante sea insuficiente para su autodepuración natural³¹.

Las condiciones climáticas de la cuenca del “alto Atoyac” son desde hace unas décadas, elementos importantes de riesgo ambiental para las actividades industriales, pero sobre todo para aquellas actividades de cultivo. Se han realizado estudios por parte de la Dirección General de Distritos y Unidades de Riego en los años 80's y 90's, donde se informó sobre la profundidad del manto freático en el suroeste, el cual en diciembre presentaba profundidades de 2 a 3 metros; mientras que en el mes de julio la profundidad era menor a los dos metros, la situación en esta década, ha hecho que el manejo de aguas por los campesinos de norte a sur realizaran riegos permanentes o bien utilizaran zonas anegables de la cuenca³².

En México los estudios socioambientales han buscado contribuir al análisis de riesgo que implican la destrucción de áreas silvestres, la contaminación causada por la industrialización, los usos y tratamientos inadecuados del agua que deterioran la calidad de vida de los grupos sociales. La CONAGUA ha reconocido que la contaminación de los ríos y otros cuerpos de agua tienen un impacto social negativo en por lo menos 24 millones de mexicanos y 35 millones de habitantes se

encuentran en situación de poca disponibilidad de agua en calidad y cantidad (CONAGUA 2014).

Por lo que respecta a la cuenca del Alto Atoyac, la vida campesina que por siglos giró alrededor de este río, actualmente se encuentra en una crisis, en menos de cinco décadas se ha producido una devastación de flora, fauna y calidad del agua, que ha hecho vulnerable a la población a exposición de sustancias químicas que pueden producir diversas enfermedades, es alarmante la situación del río pues se han modificado sus barrancas, que fungen como drenajes naturales y como sistemas de riego de esta zona, es importante señalar que en la región de la cuenca que comparten Puebla y Tlaxcala, se generan una gran cantidad de alimentos que abastece a esta zona, y los campos son regados con aguas tóxicas, por lo que la contaminación del río no solo se respira, sino que se concentra en las hortalizas que ahí se cosechan³³.

II.II Diagnóstico de la cuenca del alto Atoyac

Todas las actividades humanas que consumen agua, incluidas las actividades agropecuarias, industriales y las que se realizan en el ámbito urbano, producen como desecho “aguas residuales”. Éstas se caracterizan por tener disueltas o en suspensión sustancias químicas, partículas o microorganismos que deterioran la calidad del agua de los ríos, lagos, presas o zonas costeras en donde se descargan, sobre todo si no se tratan adecuadamente para remover las sustancias o elementos potencialmente perjudiciales.

La contaminación de los cuerpos de agua no solo afecta a los seres humanos: muchas especies de microorganismos, plantas y animales son sensibles a los contaminantes, los cuales pueden afectar su crecimiento, reproducción y supervivencia. En algunos casos, la contaminación conduce a la pérdida de especies, lo que al final ocasiona graves daños en los ecosistemas y en las comunidades que dependen de ellos. Las aguas superficiales no son las únicas afectadas por la contaminación de agua, los acuíferos también se contaminan, tanto por las fugas de aguas residuales domésticas e industriales que existen en los sistemas de alcantarillado, como por el mal manejo y los accidentes que ocurren en las instalaciones industriales y que permiten su fuga e infiltración en el suelo. A ellas debemos añadir las aguas contaminadas con fertilizantes y plaguicidas que se infiltran al subsuelo directamente desde los campos agrícolas. Darle el valor económico al agua es darle la importancia al uso racional de ella, sin embargo, las deficiencias de las instituciones gubernamentales y de mercado han provocado que lleguemos a esta etapa donde en la cuenca del “Alto Atoyac, se han modificado las

estructuras naturales del cauce del río alterando los drenajes naturales que éste tenía. Por otra parte, una falla de mercado relevante ha sido ocasionada en las zonas industriales, las cuales no cumplen con la normatividad establecida para sus descargas, o peor aún, hacen de los drenajes naturales desembocaduras de sus aguas residuales. Es importante hacer mención de los servicios ambientalmente, entendiendo que una cuenca como la del “alto Atoyac”, funciona como regulador del ciclo hidrológico, recarga los acuíferos, permite la infiltración, y procura una manutención de flujos a los diversos causes que existen a lo largo de ella, permite la mitigación de impactos ante desastres naturales, mantiene la calidad de la tierra controlando la erosión del suelo, además de aportar un caudal de aguas superficiales; manteniendo viva la biodiversidad que pueda existir en su entorno, aporta un valor monetario a las industrias que realizan sus actividades cerca de ella³⁴.

La calidad del agua es una medida de las propiedades físicas, químicas y biológicas del líquido (Peters *et al.*, 2009), que resulta fundamental conocer para poder aprovechar adecuadamente y de forma segura el recurso. Para medirla se definen estándares específicos en función de los usos que pretende dársele (por ejemplo, agua potable, para el uso agrícola o industrial; (UNDP *et al.*, 2000). Algunos de éstos utilizan parámetros que pueden medirse fácilmente, como la temperatura, conductividad, turbidez, pH y oxígeno disuelto, otras medidas se enfocan en los nutrientes, sólidos disueltos totales, metales pesados, patógenos y compuestos orgánicos³⁵.

Las aguas residuales domésticas, industriales, agrícolas y pecuarias contienen elementos y sustancias químicas disueltas, así como sólidos suspendidos, en concentración variable, que cuando son vertidas sin tratamiento, causan la contaminación de los cuerpos de agua superficiales. Se estima que a nivel mundial entre 80 y 95% del agua residual se descarga directamente a los ríos, lagos y océanos sin recibir tratamiento previo (CONAGUA, 2017). Las aguas residuales de origen municipal provienen de las viviendas, edificios públicos y de la escorrentía que se colecta en el drenaje. Sus principales contaminantes son el nitrógeno, fósforo, compuestos orgánicos, bacterias coliformes fecales y materia orgánica, entre otros (Jiménez-Cisneros *et al.*, 2010). A nivel nacional, entre los años 2000 y 2005 el volumen de descargas generado de aguas residuales municipales aumentó poco más del 6% (pasando de 250 a 265.6 m³/s); tendencia que se revirtió a partir de 2006 (CONAGUA, 2017). Para 2016, el volumen de aguas residuales provenientes de las descargas municipales fue de aproximadamente 7.2 miles de hectómetros cúbicos al año, equivalente a 228.9 metros cúbicos por segundo, de las cuales se colectaron en los sistemas de alcantarillado 6.69 miles de hectómetros cúbicos al año (212 m³/s; 92.6% del generado) y se trataron 3.9 miles de

hectómetros cúbicos en el mismo periodo (123.6 m³/s; 58.3% del colectado) (sección calidad del agua artículo SEMARNAT).³⁵

En 2010 se realizó un estudio geohidrológico por parte de CONAGUA en el Valle de Puebla, dentro de sus resultados se reflejó una sobreexplotación del acuífero, dado que la recarga total cuantificada en ese año fue de 357.6 hm³/año, mientras que la descarga total del sistema acuífero fue de 381.2 hm³/año, lo que indicó un abatimiento acumulado de -3.44 m, teniendo un abatimiento medio ponderado de -0.43 m/año, lo que representó un estrés en la cuenca del Valle de Puebla³⁶.

Para diagnosticar eficientemente a la cuenca hidrográfica del Alto Atoyac se deben contar con la descripción biofísica y socioeconómica, conocer y analizar el potencial natural y económico, identificar los usos históricos y actuales del cauce del río, conocer la problemática, necesidades y conflictos sociales que existen, que nos permitan identificar y analizar las áreas críticas. Lo anterior en su conjunto permitirá enfatizar en los sitios y zonas con alta vulnerabilidad, esto con el fin de proponer alternativas legales que ayuden a preservar el estado hídrico de la cuenca³⁷.

La morfometría de la cuenca constituye una herramienta importante para evaluar el funcionamiento del sistema hidrológico, la cantidad de barrancas en el área de la cuenca son sitios de gestión del agua a lo largo del recorrido del río, por ello es importante conocer el tipo de relieve que existe en la cuenca, Puebla se sitúa en los 2,220 msnm, esto ocasiona pendientes del cauce que pueden variar la velocidad con la que corre el agua través del río, la densidad del drenaje de la cuenca puede evaluarse en baja, alta o moderada, esto de acuerdo a la cantidad de barrancas que se encuentren en el recorrido del río y de la cantidad de personas que vivan cerca de ellas. Científicamente las cuencas que tienden a alargarse presentan drenajes con desembocaduras al mismo río, pero kilómetros más adelante, los sitios donde se presente una mayor elevación, son municipios donde los caudales del río disminuyen, ya que el agua se dispersa en los drenajes naturales, sin embargo cuando los municipios han invadido estos drenajes naturales, ya no existe una respiración natural de la cuenca, lo que conlleva a un caudal más alto y por tanto un riesgo latente de desborde del río, esto se interpreta no solo en un daño ecológico, sino también en un daño social en épocas con altas precipitaciones³⁸.

II.II.I Aspectos biofísicos de la cuenca del alto Atoyac

Los peligros de origen hidrometeorológico como las inundaciones, son una de las mayores amenazas para el bienestar social, debido a sus efectos multidimensionales, ya que se pierden vidas, se afecta la salud de la población por brotes de enfermedades y se agudizan los sentimientos traumáticos en la población afectada (Jha *et al.* 2012, Dewan 2013). También se altera la estructura y funcionamiento de los sistemas ecológicos del paisaje, se degradan los recursos que sustentan las actividades económicas, se pierde o daña la infraestructura y los servicios, y se pone en riesgo la seguridad física y patrimonial de las personas. Las consecuencias extremas de estos fenómenos pueden redirigir el carácter de las instituciones sociales, además de resultar en la aparición, permanente y costosa, de nuevas regulaciones para las generaciones futuras, y perturbar la estabilidad social (Fordham *et al.* 2013). Una muestra de la dimensión de estos impactos negativos es las pérdidas económicas que provocaron las inundaciones en México de 1980 a 1990, que fueron de 4, 537 millones de dólares (CENAPRED 2014). Esta situación se torna seria al considerar las variaciones climáticas, ya que bajo este escenario los países emergentes como México serán afectados por sus altos índices de población y pobreza³⁹.

La calidad del agua de los principales cuerpos de agua de la cuenca del Alto Atoyac fue buena hasta mediados del siglo XX, pero durante la década de los 90's, a medida que la actividad industrial, la población y la densidad urbana aumentaron en la región; la contaminación creció, y en particular la calidad del agua superficial inició un proceso acelerado de deterioro, ya que los ríos y arroyos se han usado básicamente como desagües. En el 2008 se arrojaban 24.7 mm³/año de aguas residuales, de las cuales 68.4% (16.9 mm³/año) fueron de origen municipal, 8.9% de origen industrial (2.2 mm³/año), 2.4% (0.6 mm³/año) de servicios y 20.3% (5.0 mm³/año) de otras fuentes (CONAGUA 2008). En gran parte de la cuenca la infraestructura de tratamiento para las descargas de aguas residuales era inexistente y en algunas zonas deficientes, los niveles de tratamiento estaban muy por debajo del nivel requerido por la norma. Las consecuencias de la falta de tratamiento de aguas residuales arrojadas al río Atoyac son entre otras: reducción en la producción agrícola, problemas de salud entre la población que vive en las riberas, contaminación por metales pesados, etc. Esto se ve reflejado con mayor intensidad en épocas del año con escasez de lluvias, donde la cantidad de lirio en la presa de Valsequillo es un problema alarmante, por lo que este fenómeno y la cantidad de residuos sólidos han reducido su capacidad de almacenamiento aproximadamente el 50% (SEMARNAT *et al.* 2007). Existen algunos temas ambientales relacionados con la contaminación hídrica que no han sido

contabilizados, tales como la pérdida de biodiversidad, la contaminación causada por los compuestos químicos evaporados a la atmósfera, un manejo inadecuado de residuos peligrosos, y el daño grave a la composición natural del agua⁴⁰.

La hidrografía superficial de la cuenca del “Alto Atoyac”, hace que los caudales tengan vertientes que abastecen a gran parte del Valle de Puebla, la unión del río Zahuapan con el río Atoyac, al noreste del municipio de Puebla y los causes que la atraviesan de norte a sur, llevan diferentes concentraciones de contaminantes, durante este recorrido se pueden observar diversos drenajes naturales que ayudan al cauce del río en épocas de grandes precipitaciones. Por otro lado, el volcán denominado Malinche se visualiza como un espacio soporte del sistema hídrico de la cuenca del río San Francisco, las características morfológicas favorecen un alto nivel de condensación del agua en su cima formando “capas de nieve” que permiten la retención y aportación de cantidades de agua - humedad al río San Francisco que se une al cauce del río Atoyac. Los sistemas de flujo de agua subterránea son de gran importancia para las poblaciones y las zonas industriales, en el medio natural son sitios de recarga tránsito y descarga de aguas superficiales. Los flujos de agua subterránea que convergen en la planicie de la ciudad de Puebla suelen ser sulfurosas y duras, los impactos ambientales por la expansión territorial a lo largo de la cuenca hacen que los sistemas hídricos superficial y subterráneo se vean afectados⁴¹.

Esta problemática ambiental de la cuenca del alto Atoyac es el resultado de un deterioro producido por la expansión demográfica y un desarrollo económico en los estados de Puebla y Tlaxcala, las actividades socioeconómicas que buscan incrementar la calidad de vida de la población, han afectado directamente la calidad ambiental a lo largo del recorrido del río. Una de las principales consecuencias que podemos observar debida a la expansión demográfica, es la desaparición de las barrancas, que son drenajes naturales de la cuenca y que ayudan a mantener en equilibrio al ciclo hidrológico, ya que permiten la reducción de caudal del río en épocas con altas precipitaciones, son una vía para la respiración del suelo que permiten la permeabilidad y reabastecimiento de mantos acuíferos, sin embargo al desaparecer o ser modificados por el ser humano se crea un riesgo latente de inundaciones⁴².

III.JUSTIFICACIÓN

En materia de seguridad hídrica, el estado de Puebla enfrenta actualmente un reto para proveer de agua a las siguientes generaciones, los planes de desarrollo de los últimos años han hecho hincapié en generar un equilibrio ecológico-económico que se fundamente en el aprovechamiento sustentable y sostenible, de los recursos naturales que subyacen en la cuenca del “Alto Atoyac,” es importante garantizar en cantidad y calidad los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento que se le deben brindar a la población. La restauración ecológica de la cuenca del Alto Atoyac debe incluir acciones de mantenimiento y rescate de las fuentes de abastecimiento de agua, de los sistemas de drenaje natural, valorando su importancia para el fortalecimiento de la infraestructura hídrica natural de la región y del estado en su conjunto.

Es importante entender a la infraestructura hídrica como un sistema de cuenca, que contiene aguas superficiales, subterráneas y drenajes naturales que permiten la permeabilidad del suelo y la restauración del agua, fundamentalmente en los sitios donde aún no existen poblaciones extensas y de gran aporte de aguas residuales⁴³. A través de la Ley de Agua para el Estado de Puebla, se busca articular una política hidráulica donde se dé certeza a la conservación sustentable del recurso hídrico, el cual incide directamente en el desarrollo de las actividades humanas. En el segundo artículo de la misma ley, se establece como mayor interés, la conservación de las fuentes de abastecimiento de agua y de las reservas hídricas del estado, para lo cual en su artículo cuarto se fundamenta la planeación programación, construcción, ampliación, conservación y mantenimiento de la infraestructura hídrica natural como artificial, en este punto, la inspección y vigilancia de la infraestructura hídrica natural de la cuenca recae en la competencia de los tres niveles de gobierno. El artículo tercero fundamenta la gestión y generación de información que ayuden a la conservación y preservación de las aguas nacionales, considerando como fundamento a la red primaria, que en nuestro caso son las aguas superficiales del río Atoyac y aguas subterráneas de la cuenca del mismo⁴⁴.

Considerando la normatividad estatal, en este trabajo se busca identificar los aspectos y condiciones de los drenajes naturales en la cuenca del “Alto Atoyac”, la evaluación del sistema ambiental e hidrológico en las que se encuentra la cuenca antes de su entrada a la Ciudad de Puebla Capital, los aportes científicos para la organización e identificación de sitios altamente vulnerables y de mayor importancia de restauración en la parte alta de la cuenca con denominación de “Alto Atoyac”, la relevancia de los drenajes naturales y su rol en la cuenca del alto Atoyac, identificar los impactos socioambientales que ha tenido el descuido de los drenajes naturales a lo largo de la cuenca, y como contribuyen al saneamiento y restauración del río

Atoyac, elaborando para el efecto, un diagnóstico de la situación actual de la infraestructura hidrológica en la cuenca, que permita desarrollar una concientización de la importancia de la conservación de los drenajes naturales en el sistema hídrico de la cuenca del “Alto Atoyac”⁴⁵.

IV. OBJETIVO GENERAL

Determinar el grado de afectación del drenaje de la cuenca alta del “Alto Atoyac”, en el Estado de Puebla ocasionado por la intervención humana.

IV.I Objetivos Específicos.

- 1. Determinar la pérdida de cuerpos de Agua en la región estudiada**
- 2. Identificar la presencia de Asentamientos humanos en zonas de riesgo**
- 3. Establecer las alteraciones y riesgos ocasionados por la modificación al drenaje a lo largo de la cuenca alta del río “Alto Atoyac”**

IV.II Hipótesis

Las actividades antropogénicas han deteriorado el drenaje en la cuenca alta del río “Alto Atoyac”.

V. MARCO TEÓRICO

V.I Delimitación de la cuenca

La cuenca hidrológica del río “Alto Atoyac”, forma parte de la región hidrológica del Balsas, esta cuenca a su vez comprende desde donde nacen los escurrimientos del río Atoyac, hasta donde se localiza la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo), localizada en las coordenadas geográficas 98° 05' 45" de longitud Oeste y 18° 54' 30" de latitud Norte.



Ilustración 1. Delimitación de subcuencas de la cuenca “Alto Atoyac”

La cuenca hidrológica del río Alto Atoyac, tiene una superficie de aportación de 4,135.52 kilómetros cuadrados, y se encuentra delimitada por las siguientes regiones y cuencas hidrológicas: al norte por las regiones hidrológicas números 26 Pánuco y 27 norte de Veracruz; al sur por las cuencas hidrológicas río Nexapa y río bajo Atoyac; al oeste por la región hidrológica número 26 Pánuco; y al este por la cuenca hidrológica Libres-Oriental⁴⁶.

La cuenca hidrológica del río “Alto Atoyac” se conforma por las siguientes subcuencas; subcuenca Atoyac, subcuenca Zahuapan, subcuenca del río Alseseca y la presa de Valsequillo, que consta en total de 4,000 km².

La subcuenca del río Alto Atoyac se extiende en torno al río Atoyac, el cual escurre de poniente a oriente, nace en Puebla por los deshielos y escurrimientos de la sierra nevada con dirección al sureste, entre sus primeras corrientes formadoras se

encuentra el río Texal y el río Coltzingo, cuya confluencia toma el nombre de río Atoyac (SEMARNAT 2007). En esta cuenca se localizan 22 municipios poblanos y 47 municipios del estado de Tlaxcala, los que en conjunto tienen 108 centros urbanos y más de 2.8 millones de habitantes. Los escurrimientos son primordialmente de los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, los arroyos principales son el Xochiac y Xopanac que cruzan los municipios de Domingo Arenas, San Lorenzo Xiautzingo, Huejotzingo y San Pedro Tlaltenango⁴⁷.

El 4 de enero de 2018, fue publicada la actualización referida a la disponibilidad del acuífero del Valle de Puebla, localizado mayoritariamente en la parte alta de la cuenca del “Alto Atoyac”, siendo dicha disponibilidad media anual de 24,282 hm³. Para el año 2015, este mismo acuífero tenía una disponibilidad promedio anual de 44,747 hm³ de agua, en dos años su disminución fue casi del 50 %, la inter relación de crecimiento poblacional y crecimiento económico han incrementado la demanda del recurso hídrico superficial y subterráneo, incidiendo gravemente en su disponibilidad y calidad, traduciéndose lo anterior en un deterioro del ecosistema natural de la cuenca en su conjunto, la alteración de los drenajes naturales a lo largo de cuenca del “Alto Atoyac”, donde se encuentra el acuífero del valle de Puebla, representa un detonante ambiental⁴⁸.

La cuenca del “Alto Atoyac” puede verse como un sistema conformado por tres subsistemas principales, el territorio hídrico, el urbano-territorial y el territorio de gestión; dicho esto, es importante considerar cuales han sido los procesos territoriales y de gestión en la cuenca, que han provocado un mayor impacto en los recursos hídricos en la zona metropolitana de Puebla y el actual estado de conservación de la cuenca, se debe priorizar la dinámica de los flujos de aguas subterráneas y superficiales, por ello, es necesario considerar la recursividad de la cuenca, lo que intrínsecamente implica un análisis de los procesos urbano-territoriales, el crecimiento urbano y poblacional, la demanda, el consumo, el uso del agua y el manejo del agua servida para mitigar y reducir los impactos negativos en la cuenca. Por lo anterior, el sistema complejo de la cuenca tiene condiciones económicas, tecnológicas, sociales y políticas propias de una racionalidad que se encuentra fracturada, pues no considera la capacidad de carga y recarga del sistema natural hídrico, ni la sustentabilidad territorial y la regeneración de cuenca, por lo que se hace necesario reformular los lineamientos y políticas respecto a nuestro territorio y sus subsistemas, los cuales deben garantizar el aprovechamiento de las generaciones actuales y futuras. Rolando García define como sistema complejo a “una representación de un recorte de la realidad, conceptualizado como una totalidad organizada, en la cual los elementos no son ‘separables’ y, por lo tanto, no pueden ser estudiados aisladamente” (García, 2006). Esta concepción justifica la necesidad de una visión integral y totalizadora de los procesos que definen el objeto de estudio, con la condición indispensable de conocer las interrelaciones

entre los procesos que lo estructuran, de aquí el primero cuestionamiento ¿De qué manera interactúan el tiempo, espacio y ser humano establecido alrededor de la cuenca? ⁴⁹.

Entonces el sistema hídrico de la cuenca del “Alto Atoyac”, se verá afectado por un proceso ambiental que considera las consecuencias de, entre otras causas, el cambio climático, el desarrollo poblacional, agrícola e industrial, los que en su conjunto presionan al recurso hídrico, ocasionando un deterioro de la cuenca.

La política hídrica diseñada para dotar a la población de agua potable y el desalojo de aguas servidas, han desestabilizado el ciclo hidrológico regional, ya que, al carecer de una concientización adecuada en materia ambiental, no se garantiza plenamente la recarga de los acuíferos y la recuperación de las fuentes superficiales. Por ello la importancia del análisis urbano- territorial destaca la parte social, pues la construcción de conjuntos inmobiliarios sobre suelos no aptos para asentamientos humanos, con alto impacto ambiental repercute negativamente en la función hidrológica del subsuelo y drenajes naturales que se extienden por toda la cuenca. La zona metropolitana de Puebla, en el periodo del 2010 a 2015, creció a una tasa anual poblacional del 1.27%, lo que represento un aporte anual de 178,000 habitantes, por lo que los niveles de contaminación ocasionados por el desalojo de aguas servidas al río, sin previo tratamiento, generaron un desequilibrio ambiental, el cual se vio incrementado por la sobre explotación de acuíferos, la disminución de áreas de captación, un aumento en la evapotranspiración y la disminución de la capacidad natural de regeneración de calidad del agua⁵⁰.

El vertido de compuestos tóxicos en la cuenca ha colocado desde el año de 2013 al río Atoyac, en el listado de ríos más contaminados del país (IMTA), este factor provoca daños en la salud humana, debido a la exposición de compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, generados en los causes de los diferentes cuerpos de agua que conforman la cuenca del alto Atoyac. Los núcleos poblacionales asentados en las riberas de los causes, o en zonas inundables, son los más afectados por esta emisión, siendo introducidos al cuerpo por las vías respiratorias y al contacto con la piel. Grandes núcleos de población tienen un aire ambiente exterior e interior altamente contaminado por las emisiones de los cuerpos de agua, siendo los sectores más expuestos los ancianos, amas de casa y niños, que pasan un largo periodo de tiempo en las zonas descritas. Una segunda vía de transmisión de contaminantes al ser humano, lo representa el consumo de hortalizas regadas con las aguas contaminadas de la cuenca, en las cuales existen compuestos orgánicos altamente nocivos y metales pesados. La modificación de los drenajes naturales eleva el índice de riesgo ante eventos hidrometeorológicos, ya que no solo se modifican los causes de los ríos de la cuenca, también reducimos, y en ciertos casos, eliminamos la capacidad natural de controlar altos volúmenes de

agua provocados por las precipitaciones, favoreciendo inundaciones que causan problemas ambientales, sociales y territoriales. La gestión hídrica es otro proceso que deteriora la cuenca Alta del río Atoyac, ¿De qué manera se puede interrelacionar con los subsistemas? Considerando la alta demanda en el consumo de agua, la expansión urbana y su diversidad, podemos visualizar la inequidad en la distribución de estas aguas y la variable calidad con la que llega a los hogares, a la par con un manejo inadecuado de aguas servidas, esto, en su conjunto, genera una mayor contaminación, por lo que se hace necesario que en el sistema de gestión hídrica se incluyan actores políticos y sociales que tengan criterios de manejo basados en la sustentabilidad y sostenibilidad del recurso hídrico, lo que llevara a establecer formas de operación, distribución y disposición ambientalmente correctas⁵⁰.

Diversos artículos científicos mencionan que es necesario visualizar la cuenca del Alto Atoyac como un sistema complejo, donde se deben tomar en cuenta una red de procesos multidisciplinarios que en conjunto causen orden. Considerando los principios de Morín, la noción de sistema implica una dialéctica de orden-desorganización, que, en la teoría de sistemas complejos, representa la idea de evolución de un sistema abierto. Esto obedece a procesos de desestructuración y reestructuración, lo que deriva necesariamente en la observación de la realidad como una unidad compleja y organizada, que se estructura a partir de la interrelación de sus componentes en una dinámica de cambio y variaciones; podemos decir entonces que actualmente en la cuenca del alto Atoyac, ya existe un desorden ecológico y se hace necesario, analizar y estructurar un reordenamiento ambiental que conduzca a un saneamiento ambiental de la cuenca, lo que nos garantizara la preservación y mejora de los servicios ambientales⁵¹.

Los sistemas de alcantarillado han sido rebasados por la mancha urbana en toda la zona metropolitana de Puebla, y esto se ve reflejando en las temporadas de lluvias, pues resultan insuficientes para desalojar el agua que se concentra, provocando inundaciones y daños a la estructura urbana, y dado que, en las ciudades establecidas en la cuenca, los drenajes naturales han sido eliminados por los asentamientos humanos, el problema se acrecienta. Los drenajes al ser parte del sistema hídrico tienen como función el desalojo del agua, distribuyéndola en los diferentes cuerpos receptores, favorecen la infiltración y almacenamiento, reduciendo las probabilidades de inundaciones, por lo que las estrategias políticas y sociales deben de estar dirigidas a la preservación y mejora de los componentes del sistema hídrico de la cuenca del “Alto Atoyac”, como parte fundamental de la seguridad hídrica en el estado⁵¹.

Actualmente los ecosistemas de aguas superficiales de la cuenca del “Alto Atoyac”, presentan una capacidad limitada y en muchas zonas nula para proporcionar y

sostener los servicios ambientales, ya que los impactos negativos que han generado las actividades humanas afectan de manera directa la calidad de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del “Alto Atoyac”, alterando el ciclo natural de los restantes compartimientos ambientales. La importancia de generar proyectos que reflejen la afectación y busquen la restauración ecológica de la cuenca del Alto Atoyac, se traducirán en un beneficio directo para la población que vive cerca de los cuerpos de agua, para lo cual es necesario considerar, entre otros factores; los diferentes niveles de contaminación presentes en la parte alta de la cuenca, nivel socioeconómico de la población, presencia de asentamientos originarios, núcleos urbanos, industriales y zonas agropecuarias, los que en su conjunto han perturbado, y en muchos casos alterado significativamente a los drenajes naturales⁵².

En la parte alta de la cuenca del “Alto Atoyac”, se identificarán asentamientos de alta vulnerabilidad biofísica, lo que permitirá determinar la fragilidad socio-ecosistémica de los municipios de la zona ante un fenómeno hidro meteorológico, lo cual está determinado por; tipo y uso de suelo, cobertura vegetal, grado de inclinación de la pendiente, distancia a los ríos, geología y geoformas, expansión y el cambio de uso de suelo a través de los años⁵³.

V.II Evaluación del sitio

Para el análisis de la parte alta de la cuenca del “Alto Atoyac”, es importante definir los componentes que determinan su funcionamiento, considerando los elementos tanto naturales como antropogénicos. Como elementos naturales tenemos los de origen biótico, flora, fauna y la población; mientras que en los componentes abióticos se encuentran el agua, el suelo, el aire, los minerales y el clima, los que, en conjunto, están condicionados por las características geográficas de cada municipio (latitud, altitud), geomorfológicas (relieve, densidad y tipo de drenaje).

Los elementos generados por el hombre son de tipo socioeconómico y jurídico institucional, como la cultura y tradiciones, la calidad de vida y la infraestructura desarrolladas en conjunto con las leyes y políticas, las cuales en conjunto repercuten en el aprovechamiento de los recursos naturales de la cuenca. El recurso hídrico es aprovechado y administrado diferencialmente por los municipios de la cuenca alta, y esta administración se da en función de los niveles poblacionales y de desarrollo económico, lo que conlleva a un índice de daño ecológico diferenciado en la cuenca alta⁵⁴.

Para identificar los cambios en los drenajes naturales de la cuenca alta, se analizará el ecosistema, identificando en un periodo de 20 años, las alteraciones ocasionadas por la intervención humana, considerando que;

La Cuenca Alta: (cuenca de recepción): corresponde a la zona donde nace el río, el cual se desplaza por una gran pendiente.

La Cuenca Media: (canal de desagüe) es la parte de la cuenca en la cual hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale, visiblemente puede existir erosión.

La Cuenca baja: (cono de deyección) es la parte de la cuenca en la cual el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se denomina abanico pluvial⁵⁵.

Ejemplificación.

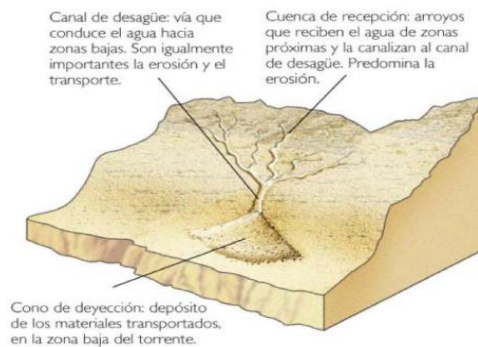


Ilustración 2. Ejemplificación de cuenca hidrológica.

V.II.I. Parámetros de forma

Los parámetros de forma se analizan mediante 3 índices que atienden a la relación del área con el cauce principal que la drena. Cada uno de estos índices considera una cuenca ideal como referencia y su análisis puede o no contemplar el relieve.

1. **Índice de Forma (IF).** Es un coeficiente adimensional que manifiesta cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial. Se expresa como la relación entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud axial. (Jardí, 1985; López Cadenas de Llano, 1998 y Senisterra, Rodríguez Vagaría, Gaspari y Mazzucchelli, 2013). Además, expresa el comportamiento de la cuenca en relación con las crecidas, Cuando IF es similar a 1, representa una cuenca de forma redonda y cuando su valor decrece, en oposición, tenderá a ser una cuenca alargada. $IF = Ap/La$.

Una cuenca alargada tendrá menor probabilidad de recibir lluvias intensas y simultáneas sobre la totalidad de su superficie y, consecuentemente, puede estar sujeta a crecientes de menor magnitud que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor⁵⁶.

2. **Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc).** Este parámetro es adimensional y relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente al de la cuenca. $K = 0.282 \cdot P / \sqrt{A}$.

Este coeficiente nos brinda información de las fuerzas y ondas de las crecidas. Un índice de compacidad cercano a 1 indica que la forma de la cuenca se asemeja a un círculo; por lo que la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor.

3. **Razón de Elongación (Re).** Es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la cuenca y la longitud máxima de la cuenca. Este parámetro explica la relación del área con el cauce principal que la drena, la fórmula utilizada es la propuesta por Schumm.

$$Re = (1.128 \sqrt{A}) / La$$

Este parámetro guarda estrecha correlación con la hidrología de la cuenca.

V.II.II. Parámetros de relieve

Los Parámetros de Relieve Involucran:

1. La Altura máxima de cuenca (HM) (m) desde la parte más elevada.
2. Altura mínima (Hm) (m) en la zona más baja o cercana al nivel del mar.
3. Altura media (Hmed) (m) Promedio entre la zona más baja y la zona máxima.
4. Desnivel absoluto (d) (m) Es la diferencia entre la zona máxima y la zona mínima.

V.II.III. Parámetros del Cauce

Otro parámetro considerado es la pendiente, la cual tiene una influencia directa sobre el tipo de drenaje, el diseño de los cauces, la velocidad y el tipo de escorrentía, lo que consecuentemente se ve reflejado en el potencial erosivo y el modelado resultante se pueden analizar:

La pendiente media del cauce principal (i). Es un indicador del grado de respuesta de un cauce ante la torrencialidad de la precipitación.

Pendiente media de la cuenca (Pend). Brinda la información sobre la velocidad de escorrentía como así también las características de los hidrogramas, las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con mayor celeridad ante las precipitaciones al aumentar los caudales⁵⁶.

V.II.IV. Parámetros de la Red de Drenaje.

Estas variables explican la configuración y el comportamiento del drenaje; asimismo aportan información de las características de las aguas superficiales de las cuencas y ayudan al análisis del comportamiento de la cuenca.

1. Densidad de Drenaje (Dd) (Km/Km²). Es el parámetro que cuantifica el grado de desarrollo de un sistema hidrográfico y permite conocer su complejidad (Fuentes Junco, 2004; Delgadillo y Páez, 2008). Es la relación entre la longitud total (Lt) de los cursos de agua perennes, intermitentes y efimeros, de una cuenca y su propia área (A). A mayor densidad de drenaje, el tiempo de escorrentía es menor, por lo cual se considera como otro indicador de peligrosidad. $Dd = Lt / A$ Las precipitaciones y la topografía, entre otros factores, condicionan la red de drenaje; en cuencas planas y de alta densidad de drenaje, se espera estabilidad de regímenes de caudales, debido al escurrimiento superficial y al aporte de aguas subterráneas (Fuentes Junco, 2004). Este parámetro brinda información de la eficiencia del drenaje.

2. Extensión media de escorrentía (EME) (km). Se la puede definir como “la distancia media” que el agua tendría que recorrer sobre el terreno en el caso de que el escurrimiento ocurriera en línea recta desde el lugar en que el agua precipita hasta el punto más próximo de un curso cualquiera de esa cuenca y por el cual se encauza.

3. Orden de la cuenca (O) (N°). Es aquel número que expresa el grado de ramificación de un sistema hidrográfico.

4. Relación de Bifurcación. Es el cociente entre el número total de cauces de un orden dado ($Nr_{(n)}$) y el número total de cursos del orden inmediato superior ($Nr_{(n+1)}$) por lo tanto:

$$Rb = Nr_{(n)} / Nr_{(n+1)}$$

De acuerdo con Summerfiel (1991), si la litología en una cuenca es homogénea, la relación de bifurcación rara vez es mayor de 5 o menor de 3; si la cuenca es muy

elongada, con una alternancia de afloramientos contrastantes en sus características litológicas, pueden obtenerse valores mayores a 10. Cuenca homogénea; $3 \leq Rb \leq 5$ Cuenca muy elongada; $Rb > 10$ Esta variable es importante para describir el comportamiento del sistema fluvial (Horton, 1945). Strahler (1964) interpreta los valores de Rb en cuanto a su torrencialidad; asocia valores bajos con cuencas bien drenadas pero que pueden generar crecidas más violentas que aquellas que poseen un Rb alto. Por otra parte, el parámetro Rb media entre los diferentes órdenes de una cuenca ha sido utilizado por diversos autores (Llamas, 1993; Ibisate González de Matauco, 2004)⁵⁶.

5. Coeficiente de torrencialidad (Ct). Se determina a partir de la relación entre el número total de cursos de primer orden (Nc1) y el área total de la cuenca. Multiplica la densidad de drenaje por el número de cursos de orden 1, en relación con la superficie. A mayor número de cursos de primer orden y menor superficie, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Romero Díaz y López Bermúdez, 1987). Es un indicador de la erodabilidad lineal y la capacidad de descarga de una cuenca. Debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva, altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, menores tiempo de llegada al pico y alta torrencialidad. En otras palabras, los cursos de orden 1 son los de mayor importancia en la generación de flujos torrenciales y de inundaciones aluvionales veloces (Busnelli y Horta, 2014). Este parámetro permite interpretar el comportamiento del flujo de agua en la cuenca. $Ct = Nc1 / A$

Clasificación de la red de drenaje de la cuenca			
Rangos (km / km ²)		Clases	
Fuentes Junco		Delgadillo y Páez	
0.1 – 1.8	Baja	<1	Baja
1.9 – 3.6	Moderada	1 – 2	Moderada
3.7 – 5.6	Alta	2- 3 >3	Alta

Tabla 1. Clasificación de red de drenaje.

En México para identificar los tipos de redes de drenaje existentes en los sistemas fluviales, autores como Strahler, 1966; Seco, 2000; Tarbuck y Lutgens, 1997, coinciden en que, son el producto de diversos factores, entre los que destacan:

1. Historia geológica y dinámica geomorfológica del territorio.
2. Diferencias en la composición y dureza de las rocas subyacentes.
3. Control estructural.
4. Movimientos tectónicos recientes.
5. Morfolineamientos.

6. Intensidad y largo de la pendiente y Factores hidroclimáticos.

V.II.V. Patrones de drenaje

1. Dendrítico.

Es el patrón que más frecuentemente se presenta y se caracteriza por mostrar una ramificación arborescente, en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos. Su presencia indica suelos homogéneos, y generalmente se presenta en áreas de rocas sedimentarias blandas, tobas volcánicas, depósitos glaciales y antiguas llanuras costeras. (CEOTMA, 1981). Debido a la relativa uniformidad del sustrato y similar resistencia a la erosión, la forma del patrón dendrítico está determinado básicamente por la dirección de la pendiente del terreno (TARBUCK y LUTGENS, 1997). Se caracteriza por la unión irregular de los afluentes con gran variedad de ángulos, generalmente menores a noventa grados. Se desarrolla sobre rocas de resistencia uniforme y denota una notable falta de control estructural. Se asocia a estratos de rocas casi horizontales y a áreas de rocas masivas, pero puede encontrarse sobre rocas complejamente metamorfizadas, particularmente cuando ocurre una superposición o epigénesis. Las corrientes que lo constituyen pertenecen al tipo insecuentes (SECO, 2000)⁵⁷.

2. Rectangular.

Es otra variante del drenaje dendrítico. Los tributarios suelen juntarse con las corrientes principales en ángulos casi rectos y dan lugar a formas rectangulares controladas por las fracturas y las juntas de las rocas. Cuanto más claro es el patrón rectangular, más fina será la cubierta del suelo. Suelen presentarse sobre pizarras metamórficas y esquistos; en areniscas resistentes si el clima es árido, o en areniscas de poco suelo en climas húmedos. Tanto la corriente superficial como sus tributarios presentan curvaturas en ángulo recto. Refleja el control ejercido por sistemas de grietas o fallas (SECO, 2000). En este caso, por lo general los valles y escarpes son producto de antiguas fallas geológicas que se han mantenido por millones de años, y desde entonces se encuentran en relativa estabilidad, en regiones no afectadas por procesos orogénicos⁵⁷.

3. Angulado

Es una variante más del drenaje dendrítico en la que las fallas, fracturas y sistemas de unión han modificado su forma clásica. Aguas arriba son comunes las curvas fuertes formando ángulos grandes ya que los tributarios suelen estar muy controlados por las rocas. El tipo y la dirección de los ángulos pueden reflejar un tipo específico de roca. Por ejemplo, las areniscas tienen tendencia a formar uniones paralelas, mientras que las calizas dan lugar a uniones muy agudas⁵⁷.

4. Pinnado

Son cuencas dendríticas modificadas e indican un elevado contenido de limo en el suelo. Son típicas de zonas loess o llanuras aluviales de textura fina. El drenaje tiene la forma de nerviación de ciertas hojas, en el que los tributarios se juntan formando ángulos casi rectos que se van agudizando aguas arriba.

5. Radial

Esta forma de drenaje se caracteriza por una red circular con canales paralelos procedentes de un punto elevado. Suele existir una corriente colectora principal que circula alrededor de la base de la elevación topográfica. Los volcanes y cerros aislados suelen presentar este tipo de drenaje (CEOTMA, 1981). Presenta corrientes que divergen de una región elevada central. Se desarrolla en alturas de domos, conos volcánicos y otro tipo de elevaciones aisladas. En ocasiones este tipo de drenaje se relaciona con zonas de elevamientos neo-tectónicos (SECO, 2000)⁵⁷.

6. Anular

Es similar al radial, pero en este caso las uniones de la roca madre o las fracturas hacen que los tributarios sean paralelos. Se presentan estos tipos de red en cerros graníticos o sedimentarios. Aparece desarrollado sobre estructuras de domos fuertemente denudados que presentan alternancia de estratos resistentes. Las corrientes se establecen sobre las capas menos resistentes (subsecuentes) con cursos circulares y paralelos entre sí, ajustadas a la estructura de domo⁵⁷.

7. Centrípeto

Es una variante del drenaje radial en la que el drenaje se dirige hacia un punto central. Suele reflejar una depresión o el fin de un anticlinal o sinclinal (CEOTMA, 1981). Está constituido por corrientes que convergen en una depresión. Se asocia por lo general a estructuras negativas y zonas de subsidencia por la tectónica reciente, cráteres o depresiones cársicas⁵⁷.

8. Trellis o enrejado

Presenta tributarios paralelos y pequeños arroyos también paralelos que se unen en ángulos rectos. Refleja más la estructura de la roca madre que el tipo de roca, y usualmente los tributarios se juntan formando ángulos casi rectos que se van agudizando aguas arriba (CEOTMA, 1981). Representa un sistema de corrientes sub-paralelas, generalmente alineadas a través de contactos litológicos o entre formas del relieve paralelas o casi paralelas. Es típico de regiones fuertemente plegadas, donde el río principal (subsecuente) corre sobre estratos blandos y los tributarios son obsecuentes o resecuentes. Los tributarios se unen al río principal casi en ángulo recto, a su vez aquellos presentan confluencias con sus tributarios con ángulos similares, por lo que estos últimos serán paralelos al río principal. Este tipo de red refleja un marcado control estructural sobre las corrientes superficiales (SECO, 2000).

9. Paralelo

Se presentan en zonas homogéneas, de pendientes uniformes y suaves en las que las corrientes principales reflejan fallas o fracturas. Los tributarios suelen unirse formando ángulos generalmente iguales. Son típicas de llanuras costeras y de grandes afloramientos basálticos (CEOTMA, 1984). Se encuentra donde existe una fuerte pendiente y control estructural que conduce a un espaciamiento de las corrientes de dirección paralela o casi paralela (SECO, 2000)⁵⁷.

VI. MARCO MÉTODOLÓGICO

VI.I. Identificación del tipo de drenaje y Cálculo de NDVI.

De acuerdo en la bibliografía descrita en el punto V.II.V “Patrones de drenaje” se identifica a la cuenca hidrológica del alto Atoyac como un drenaje dendrítico establecido por la Comisión Nacional del Agua. Una vez identificado el tipo de drenaje natural que se presenta en la cuenca alta del río Atoyac, específicamente en la zona de estudio, podremos evaluar e identificar el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), este indicador funciona por la densidad de vegetación que existe en el suelo reflejándose en el espectro del infrarrojo cercano y el espectro rojo visible, es utilizado a nivel internacional para identificar las zonas con altas sequías o variabilidad de vegetación en diversos puntos de interés científico, de igual manera identifica zonas con presencia de cuerpos de agua en los valores negativos cercanos a la unidad negativa (-1) se calcula con la siguiente fórmula general:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

Dónde: NIR es la espectroscopía de reflectancia en el infrarrojo cercano

RED es la espectroscopía de reflectancia en el rojo visible

Utilizando esta fórmula se dice que; la densidad de vegetación en algún punto determinado de la imagen satelital es igual a la diferencia de las intensidades de la luz reflectada en el rango del rojo infrarrojo, entre la suma de esta intensidad de luz.

Los valores se definen del -1 a 1.0 donde, los valores negativos denotan nubes, agua y/o nieve, los valores más cercanos a cero representan rocas y suelo descubierto, aquellos valores que se encuentren entre el 0.1-0.001 les corresponden a áreas sin rocas, arena o nieve, los valores de 0.2-0.3 son característicos de zonas con pasturas, praderas y/o arbustos, mientras que, los valores de 0.6-1 representan bosques templados o zonas tropicales.

El fundamento físico de este índice se explica de manera sencilla a continuación; un suelo saludable generalmente presenta un alto índice de cubierta vegetal, la cual tendrá altas concentraciones de clorofila, ésta absorbe una gran cantidad de luz visible para realizar la fotosíntesis, mientras que la estructura celular de las hojas refleja (i) la luz infrarroja cercana: Cuando un suelo sufre por diferentes causas deterioro en su cubierta vegetal, las plantas existentes absorben mayor cantidad de luz del infrarrojo cercano en lugar de reflectarla, por ello el análisis de la modificación del infrarrojo cercano en comparación con la luz roja visible,

proporciona un indicador preciso de la presencia de clorofila, que se vincula a la salud de las plantas y así mismo a la vegetación del suelo como se muestra en la ilustración 3 ⁶².

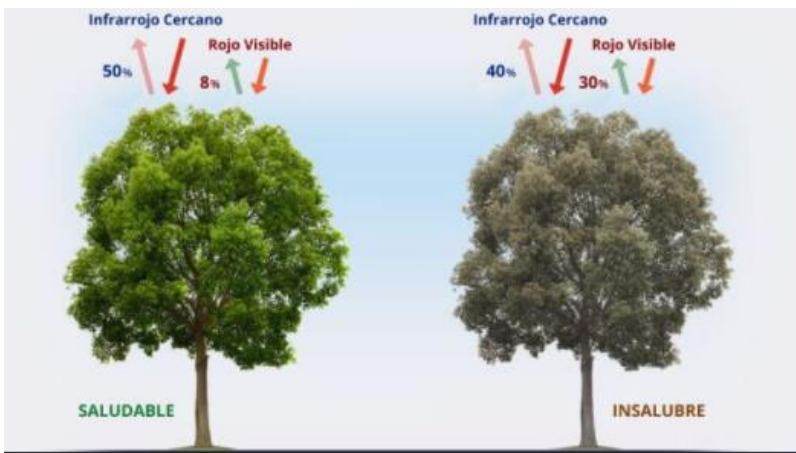


Ilustración 3. Representación del fundamento de NDVI, fuente: Earth Observing System 2021.

Cuando se modifica el uso de los suelos agrícolas, hacia el uso urbano y/o industrial, sucede algo similar, ya que se reduce sustancialmente la presencia de vegetación y por lo tanto es un hecho la pérdida vegetativa en la zona de estudio, que a su vez también será una pérdida del sistema natural de la cuenca del alto Atoyac.

VI.I. Imágenes del satélite LANDSAT

LANDSAT (LAND= Tierra y SAT= Satélite) es un conjunto de satélites que se integraron en las primeras misiones de EEUU para el monitoreo de los recursos del planeta mediante la observación de alta resolución de la superficie terrestre. Los satélites LANDSAT orbitan alrededor de la tierra en órbita circular helio sincrónica a 705 km de altura, con una inclinación de 98.2° respecto al ecuador y un período de 99 minutos. La órbita de los satélites está diseñada de tal modo que cada vez que estos cruzan el ecuador de norte a sur lo hacen entre las 10:00 y las 10:15 de la mañana hora local. Los satélites de LANDSAT están equipados con instrumentos específicos para la teledetección multiespectral. El primer satélite LANDSAT, (en principio denominado ERTS-1) fue lanzado el 23 de julio de 1972. El último de la serie es el LANDSAT 8, que fue puesto en órbita el 11 de febrero de 2013.

Las imágenes de LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, especialmente elegidas para el monitoreo de la vegetación, aplicaciones geológicas y estudio de los recursos naturales. Estas bandas pueden combinarse generando nuevas imágenes que incrementan notablemente sus aplicaciones. Especial mención merece el satélite LANDSAT 8 que por sus 11 bandas permite amplias posibilidades de combinación entre ellas, posibilitando una gran cantidad de información asociada a esta investigación, de las cuales nos enfocaremos a las bandas referentes del infrarrojo cercano y el rojo.

VI.II. Herramientas para el procesamiento de imágenes satelitales

LANDSAT.

1. Visores LANDSAT Look y Sentinel 2 Look

LANDSAT Look Viewer es una herramienta prototipo que ha sido desarrollada para permitir una rápida visualización en línea y acceso a los archivos de imágenes de USGS Landsat. Este visor nos permite:

1. Explorar de forma interactiva el archivo LANDSAT en resolución completa directamente desde un navegador web común.
2. Búsqueda de imágenes LANDSAT específicas según el área de interés, fecha de adquisición o cobertura de nubes.
3. Compara las características de la imagen y los cambios a través del tiempo.
4. Mostrar capas de información de mapas configurables en combinación con las imágenes del LANDSAT.
5. Creación de imágenes personalizadas y exportación como un simple archivo gráfico.
6. Búsqueda por dirección o lugar, o hacer zoom en un punto, cuadro delimitador, Teselas Sentinel-2 o Landsat WRS-1 o WRS-2 Ruta / Fila.
7. Generación y descarga de animaciones de vídeo de las imágenes más antiguas a las más recientes que se muestran en el visor.

2. LANDSAT Viewer

LANDSAT Viewer es un explorador de imágenes por satélite para teledetección. Se trata de una aplicación desarrollada por EOS DATA ANALYTICS, INC., cuyas ventajas son:

1. A partir de este portal web no es necesario descargar una imagen LANDSAT 8 completa
2. No es necesario utilizar un software especial para abrirla y realizar la combinación de bandas entre sí.
3. Es gratis.
4. Permite descargar las imágenes.
5. Podemos filtrar imágenes utilizando diferentes criterios, como son; por año, mes, porcentaje de nubosidad y elevación solar.

Este servicio nos ofrece la posibilidad de obtener diferentes combinaciones de bandas, como una imagen pancromática, falso color, infrarrojo cercano, agricultura, tierra/agua, análisis de vegetación, penetración atmosférica, etc.

3. Libra

Otra opción es utilizar Libra, un navegador de imágenes creado por Astro Digital, open source, que nos permite descargar todo el rango de bandas de LANDSAT 8.

4. Earth Explorer

Earth Explorer es un desarrollo, del Servicio Geológico de los Estados Unidos: <http://earthexplorer.usgs.gov/>, en el que se pueden introducir diferentes criterios de búsqueda (fechas, porcentaje de nubes, path/row, sensor, etc.). Incluso se pueden realizar descargas masivas de imágenes mediante la aplicación bda, disponible en la página.

5. Semi-Automatic Classification Plugin

Semi-Automatic Classification Plugin es una herramienta desarrollada para el sistema de información geográfica en QGIS, que permite realizar una clasificación supervisada por default, el procesamiento de imágenes de teledetección multispectrales e hiperspectrales. Ofrece un conjunto de herramientas para la descarga de imágenes LANDSAT, SENTINEL, MODIS, etc, con un preprocesamiento y post procesamiento (USGS American, 2021).

6. Global Land Cover Facility (GLCF)

Herramienta para descargar imágenes LANDSAT de forma gratuita desde Global Land Cover Facility (GLCF) de la Universidad de Maryland. El GLCF es un centro que se encarga del estudio de la cubierta vegetal a través de imágenes de satélite, analizando los cambios tanto locales como globales.

1. Se accede a la página de Global Land Cover Facility (GLCF) y, en el panel Download Data, selecciona Earth Science Data Interface (ESDI).

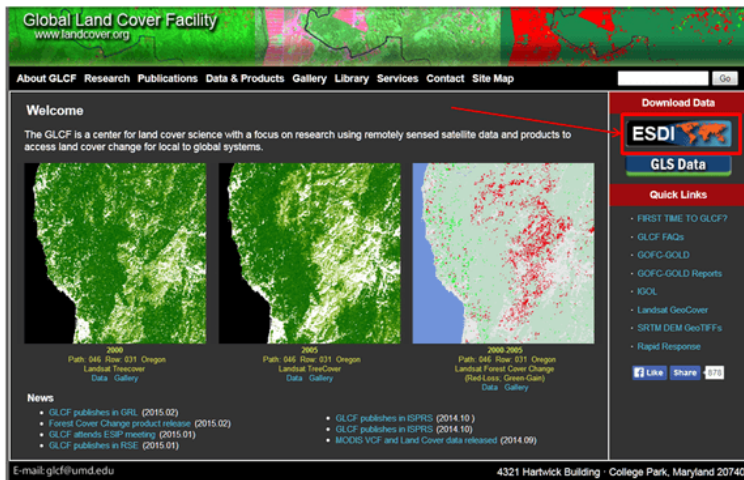


Ilustración 4. Ejemplificación de ingreso a GLCF, fuente: Plataforma didáctica.

2. Una vez que haya cargado la página se accede a Map Search.

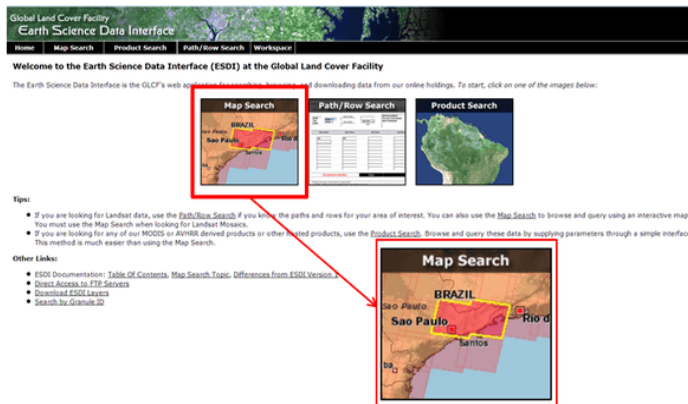


Ilustración 5. Ejemplificación, búsqueda y descarga de imágenes satelitales.

3. Se abrirá la interfaz ESDI Search en la que se presenta un mapa global. En este caso vamos a descargar una imagen correspondiente a Madrid (España); click en la pestaña Map Layers y en Grid Layers marca WRS-2.

4. Por otro lado, en la tabla de contenidos de la parte izquierda marca el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) en Landsat Imagery.

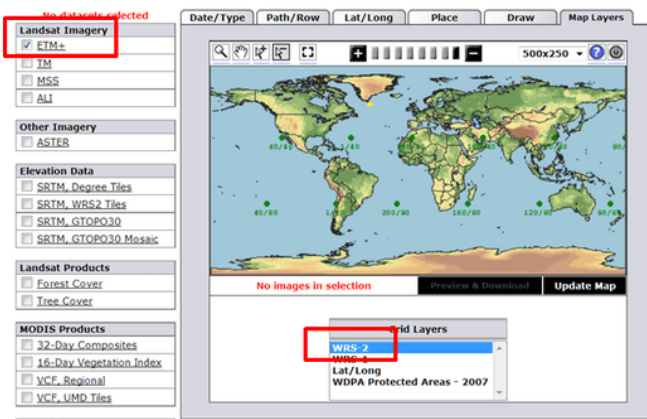


Ilustración 6. Ejemplificación de navegación y búsqueda de información.

5. Navega ahora hasta situarte sobre dicha localización. Para ello selecciona la herramienta Zoom In zoom in y se van haciendo clicks de ratón sobre el área seleccionada hasta acercar lo suficiente la imagen. Una vez se pueda observar la extensión de las imágenes con nitidez, se selecciona la herramienta Select select y se hace clic en la imagen deseada.

A su vez se activará el botón Preview & Download, se hace clic en él y se abrirá una nueva ventana en la que aparecerán las imágenes de satélite disponibles por estado, productor, atributos, tipo y lugar, identificadas por un ID. Si se realiza un clic sobre ellos aparecerá una vista previa de la imagen como se muestra en la ilustración 7.

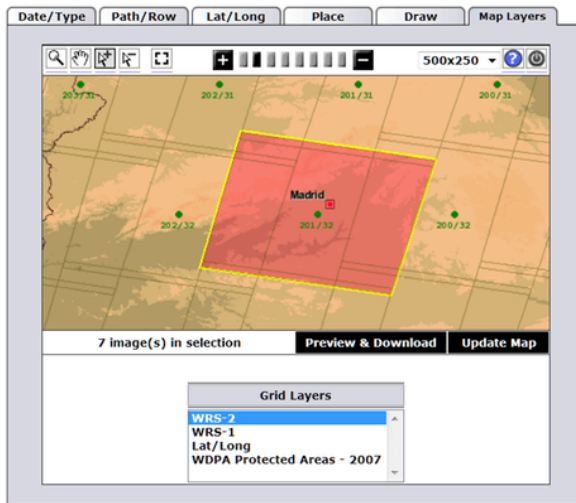


Ilustración 7. Ejemplificación del tipo de imagen que desea descargar.

VI.II.I. Almacenamiento de las imágenes LANDSAT en unidades de memoria

Procedimiento

1. Selecciona la imagen deseada y haz clic sobre el botón Download. Accederemos a un directorio FTP en el que encontramos los enlaces de descarga para cada banda individual en formato GEOTIFF, como se muestra en la ilustración 8.

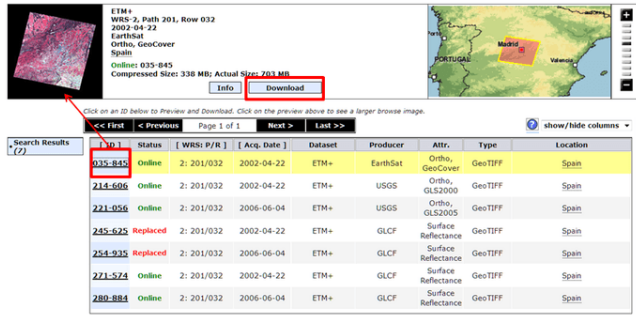


Ilustración 8. Ejemplificación de archivos GEOTIFF

2. Se presiona sobre ellos y se guardan las imágenes en formato .zip en el disco duro, los nombramientos de carpetas estarán por default, para especificar se nombrarán de acuerdo a los años y bandas que contenga el archivo GEOTIFF.

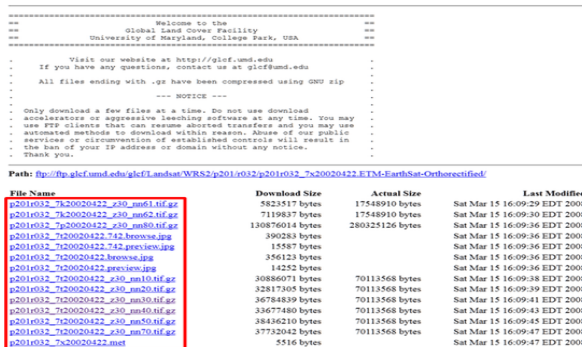


Ilustración 9. Nombramiento de archivos y carpetas de archivos GEOTIFF

Se descomprime dicho archivo y se procesa la imagen en cualquier software GIS como ArcGIS, QGIS o gvSIG, para efectos de este trabajo se utiliza QGIS por ser software de descarga gratuita⁶³.

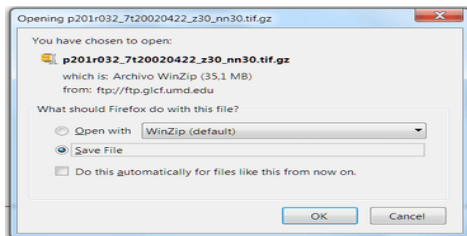


Ilustración 10. Descompresión y verificación de imágenes satelitales.

VI.III. Procesamiento de imágenes LANDSAT

- Una vez extraídas las imágenes del satélite LANDSAT, mediante las herramientas QGIS, se seleccionan las bandas a trabajar, aplicando los siguientes criterios: Las imágenes satelitales extraídas de LANDSAT 7 se trabajarán en las bandas 4 y 3 para la ecuación de NDVI.
- Las imágenes satelitales extraídas de LANDSAT 8 se trabajarán en las bandas 5 y 4 para la formulación de la ecuación de NDVI.
- En el caso de que la imagen satelital extraída de los satélites LANDSAT 7 y LANDSAT 8, no tenga el archivo completo de GEOTIFF, se recurrirá a usar la banda 1 y 2 con las que se determinara la densidad vegetativa o pérdida de cuerpos de agua, así se puede complementar información relevante para determinar el deterioro ocasionado por las actividades antropogénicas.
- Las imágenes satelitales se guardarán en carpetas identificadas por año y bandas de trabajo, siendo estas de los años 1995, 2000, 2005, 2010, (se trabajará en las bandas 4 y 3). Recordando que la última actualización del satélite fue en 2013, tras él envió de LANDSAT 8 por lo que hasta el 2005 se tienen imágenes de LANDSAT 7 o versiones anteriores; a partir del año 2015, 2020 y 2021, se utilizan las bandas 4 y 5 en la versión de LANDSAT 8.
- Por condiciones de la homogeneidad de la información y menor densidad de nubosidad, la cual interfiere en el proceso de cálculo, se determinó el periodo de trabajo comprendido entre los meses de Febrero- Mayo.
- Las imágenes satelitales LANDSAT 7 y LANDSAT 8 utilizadas presentaron un nivel de nubosidad menor al 20%, lo que permitió mantener homogénea la resolución. Los satélites LANDSAT 7 y LANDSAT 8 captan imágenes cada 16 días y trabajan en una escala de 30 píxeles, que representan 30 metros cuadrados de imagen, por lo cual tenemos que a mayor acercamiento se tiene una mejor interpretación de información de la imagen satelital.

VI.IV. Procesamiento con Software QGIS.

Con esta herramienta computacional se procedió a trabajar con las imágenes satelitales como se indica a continuación:

1. Las imágenes del satélite LADSAT 7 y LANDSAT 8 fueron tratadas como archivos RÁSTER, esto para no alterar o perder los colores monocromados del infrarrojo cercano y lejano, se muestra el acceso a QGIS en la ilustración 11.

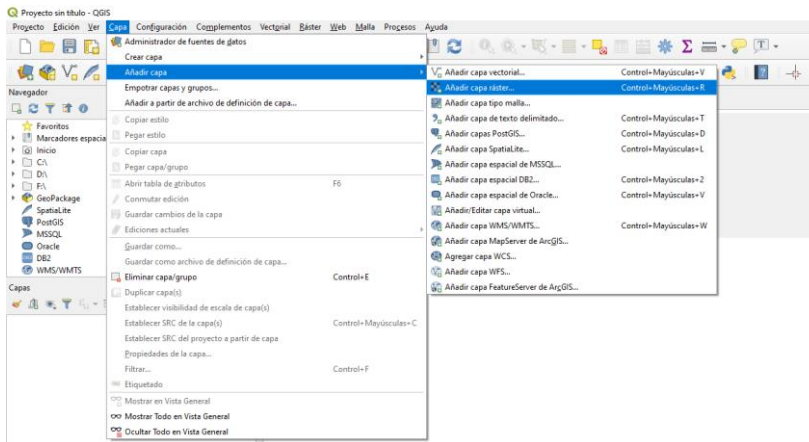


Ilustración 11. Ejemplificación comando para imágenes satelitales en RASTER de documentos a QGIS.

2. La delimitación de la zona de estudio fue identificada como un archivo de texto limitado, para ello, UTILIZANDO Google Earth se ubicaron las coordenadas UTM del polígono de trabajo de los municipios de San Martín -Texmelucan. Domingo Arenas, Tepetitlán y la Huejotzingo. Posteriormente las coordenadas UTM se exportaron a un archivo de Excel donde las variables "x", "y", y "z", se identificaron de la siguiente manera:

X es igual a la coordenada norte

Y es igual a la coordenada este

Z es la altitud a la que se encuentra la coordenada.

3. Una vez vaciada la información en el archivo de Excel se guardó como un archivo de texto delimitado identificado como "Polígono de Estudio".

4. En el Software de QGIS, a las imágenes satelitales LADSAT 7 y LANDSAT 8 se añadieron las bandas espectrales 3 y 4 adjuntando el texto delimitado del polígono de estudio.

5. En el comando RÁSTER del software QGIS, se insertó la ecuación de NDVI.

6. Se verifican las coordenadas en UTM 14N (Sistema de Coordenadas de Universal Transversal de Mercator).

7. Se genera un nuevo archivo RÁSTER de salida renombrado y con los cálculos de NDVI correspondientes a la imagen satelital ingresada.

8. Para centrar el proceso de cálculo del NDVI en el polígono de interés, se recortó la imagen empleando el comando RÁSTER, extracción, recortar, clíper y se verificaron nuevamente las coordenadas, esto con la finalidad de que el mapa completo a generar se encuentre en el mismo sistema de proyección.

9. El software QGIS procesará únicamente las capas que tengan las curvas de nivel del suelo, ya que así se permitirá identificar con mayor claridad la densidad vegetativa relacionada al cálculo de NDVI del polígono de interés.

10. Una vez obtenidas las curvas de nivel se filtraron los valores de NDVI a un intervalo de 0.05, con lo cual se obtienen barridos espectrales que identificaran las condiciones del suelo, siendo estas:

- Sí $NDVI > 0$ zonas con alta densidad vegetativa
- Sí $NDVI < 0$ zonas con cuerpos de agua.
- $NDVI = 0$ o valores cercanos a 0 zonas con pastizales.

11. Una vez filtrados los datos de las curvas de nivel del polígono de estudio se generó un mapa que fue superpuesto en la mascarilla satelital de Google Earth para su fácil y rápida interpretación.

12. Los valores finales de NDVI obtenidos dentro del polígono que representa a los municipios de interés se visualiza en un gráfico por cada año de estudio.

13. El análisis espacio temporal del NDVI se realizó en periodos de cinco años, lo que permitió notar claramente la variación del uso de suelo dentro de los municipios que conforman el polígono de estudio.

14. Se introdujo como punto de referencia inicial y final el año de 1995 y 2021 respectivamente, para identificar plenamente la variación de NDVI en el polígono de estudio.

15. Se desarrolló un gráfico que concentra las variaciones de NDVI en el periodo de estudio.

VI.V. CONDICIONES DEL SITIO.

6. Municipio de San Lorenzo Chiautzingo.

Colinda al norte con el municipio de San Felipe Teotlalcingo y al sur con el municipio de Huejotzingo, tiene una superficie de 81.22 km cuadrados, el municipio pertenece a la cuenca del río Atoyac, una de las más importantes del estado, que tiene su nacimiento cerca de los límites de los estados de México y Puebla, en la vertiente oriental de la Sierra Nevada; los ríos que lo atraviesan, generalmente de oeste a este, provienen de la Sierra Nevada, y son tributarios del Atoyac, destacan los arroyos Seco, Coeltzala, Tenango, Ixotitla, Tepetzintla, Xochiac, y Santa Clara, que en su recorrido forman la cañada Tlapanquitétl y las barrancas, la Ventana y Texoloc. Tiene una población de 22, 039 habitantes de los cuales el 47.6 % son hombres en comparación con el año 2010 el municipio creció un 17.5 %, en 2020 el 2.52% de la población no tenía acceso a sistemas de alcantarillado y el 0.84% no contaba con red de suministro de red de agua el 1.54 % no contaba con un baño⁵⁸.

7. Municipio de Huejotzingo

Colinda al norte con los municipios de San Lorenzo Chiautzingo, San Martín Texmelucan y el estado de Tlaxcala; al este con el estado de Tlaxcala y los municipios de Tlaltenango y Juan C. Bonilla; al sur con los municipios de Juan C. Bonilla, San Pedro Cholula, Domingo Arenas y Calpan; al oeste con los municipios de Calpan, San Nicolás de los Ranchos, San Salvador el Verde y Chiautzingo, ocupa el 0.5% de la superficie del estado y cuenta con 64 localidades. Su provincia fisiográfica es el eje Neovolcánico, presenta un suelo aluvial al 39%, es decir formado por los sedimentos que las corrientes de agua llevan. Su hidrografía pertenece a la región hidrológica del Balsas al 100%, se ubica en la cuenca del "Alto Atoyac". En la subcuenca del río Atoyac – San Martín Texmelucan, se encuentra el 94% de su territorio y el 6% restante pertenece a la subcuenca del río Nexapa. Sus corrientes de agua son los ríos río Actiopa, Xopanac, Alseseca, San Diego, Santa Clara y Xochiac, que son corrientes que alimentan al río Atoyac. Su zona urbana hasta el 2010, era solo el 13% de la extensión total⁵⁹, en el último censo realizado el municipio creció un 3.7% en comparación con el 2015. Basado en datos del archivo histórico de localidades INEGI 2021 con clave geoestadística 210740021, en la localidad de Santa Ana Xalmimilulco categorizado como pueblo cuenta con un total de 17, 865 habitantes, divididos en 8,762 hombres y 9,103 mujeres, su principal actividad económica es la agricultura de riego.

8. Municipio de Tepetitla

Colinda al norte con el estado de Puebla y el municipio de Ixtacuixtla de Mariano Matamoros; al este con los municipios de Ixtacuixtla y Nativitas; al sur con el municipio de Nativitas y el estado de Puebla; al oeste con el estado de Puebla con el municipio de San Martín Texmelucan. Ocupa el 0.6% de la superficie total del estado de Tlaxcala cuenta con 21 localidades y una población total de 16,368 habitantes (2020) presenta un suelo aluvial del 61%, su suelo dominante es el cambisol y pertenece a la región hidrológica del Balsas al 100%. Está enmarcado en la cuenca del río Atoyac y en su totalidad en la subcuenca del río Atoyac-San Martín Texmelucan. Sus corrientes superficiales son los ríos Atoyac y Ajejela. Su uso de suelo es del 66% agrícola y tiene una zona urbana que abarca el 33% de su territorio (INEGI 2021)⁶⁰.

9. Municipio de San Martín Texmelucan.

Colinda al norte con el municipio de San Salvador el Verde y el estado de Tlaxcala, al este con el estado de Tlaxcala y el municipio de Huejotzingo; al sur con los municipios de Huejotzingo y Chiautzingo; al oeste con los municipios de Chiautzingo, San Felipe Teotlalcingo y San Salvador el Verde. Ocupa el 0.3% de la superficie del estado, cuenta con 45 localidades y una población total de 130,316 habitantes (INEGI 2010). Su fisiografía se localiza en la provincia del eje Neovolcánico, presenta una humedad media anual del 52%, tiene un suelo aluvial del 35%, se encuentra en la región hidrológica del Balsas al 100%, su cuenca es la del "Alto Atoyac" y su subcuenca es la del río Atoyac – San Martín Texmelucan. Sus corrientes de agua superficial son los ríos Atoyac, Ayotla, Cotzalá y Xochiac. En 2005 tenía una población de 130,316 habitantes, con 27,832 viviendas particulares habitadas, mientras que en 2010 la población total fue de 141,112 habitantes, la cual representaba el 2.4% de la población total del Estado de Puebla, en comparación con los datos del 2020, San Martín Texmelucan se ubica entre los 3 municipios con mayor población con un total de 155,738 habitantes, ocupando el tercer lugar, con un total de 38,312 viviendas habitadas, tiene el quinto lugar como municipio con crecimiento poblacional, por lo que su demanda de suministro hídrico crece (INEGI 2020)⁶¹.

VII. DESARROLLO

VII.I Delimitación del Polígono de Estudio en la Cuenca.

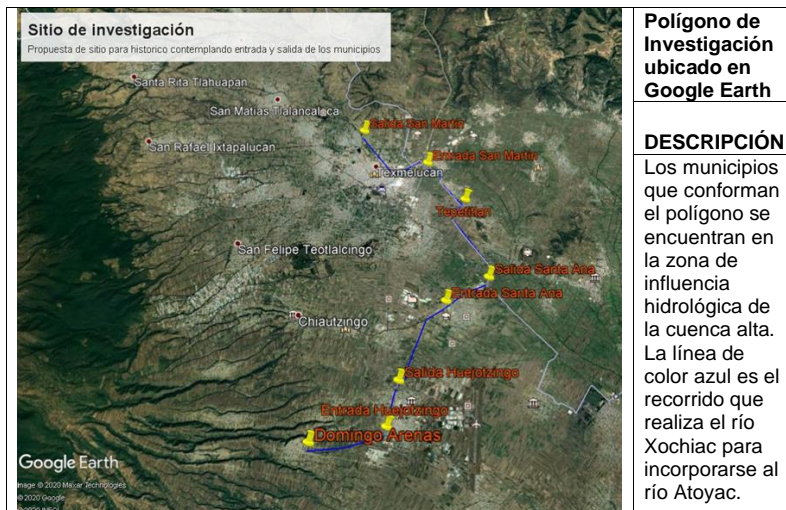
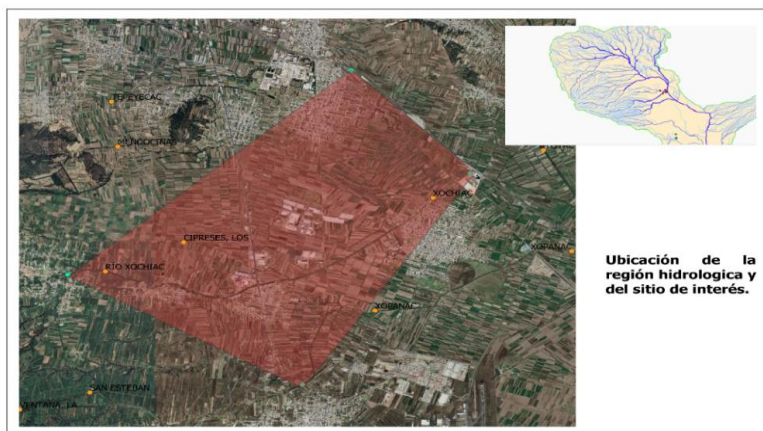


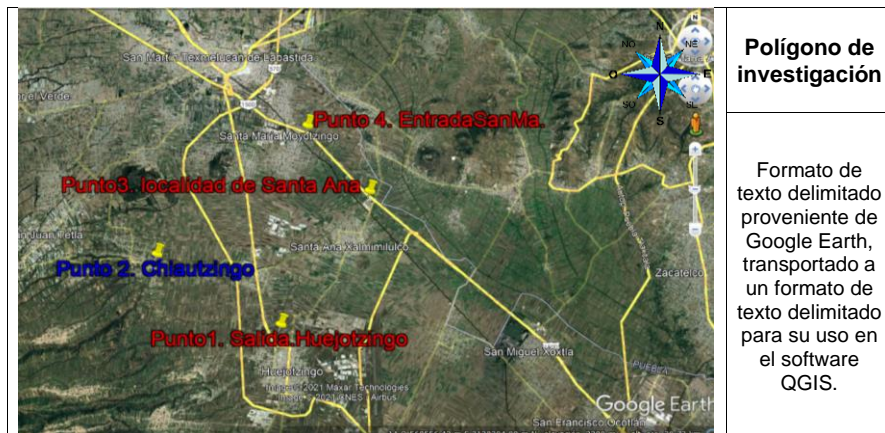
Ilustración 12. Representación de la zona de influencia hidrológica de la cuenca alta.

DESCRIPCION DE LA ZONA DE ESTUDIO

1. El polígono de estudio se localiza en la región hidrológica con código 18ad, perteneciente a la subcuenca del alto Atoyac.



Mapa 1. Ubicación del sitio de interés.



Mapa 2. Puntos para establecer polígono de estudio, extraído de Google Earth.

2. Identificada la trayectoria de los cuerpos de agua y drenajes, se contrae, unifica y ordena la información proveniente de las imágenes satelitales LANDSAT 7 Y LANDSAT 8, la cual es procesada con el software QGIS; en la siguiente imagen se presenta el polígono establecido una vez identificados los municipios de interés.

VII.II Identificación del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI)

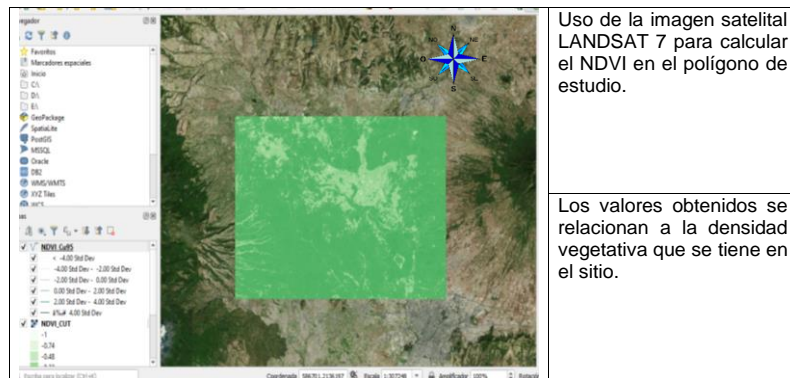


Ilustración 13. Representación de imagen satelital procesada en QGIS.

Acorde a lo establecido en el capítulo V.III.III donde se especifica el procesamiento de imágenes satelitales, se realizaron simulaciones del polígono de estudio, cuyas proyecciones cartográficas se presentan a continuación:

1. Se considera la ecuación y en lenguaje algebraico se incorpora en QGIS, recordando que este software utiliza Phyton para procesar el lenguaje algebraico de las interacciones que se deseen realizar.
2. Se recorta la imagen satelital al polígono de interés ya establecido con anterioridad.
3. Se requiere el texto delimitado para georreferenciar las coordenadas llevadas de Google Earth a QGIS.

VII.III. SIMULACIONES.

Proceso de simulación.

1. Para cada simulación se utilizó un paquete de datos GEOTIFF que fue descargado previamente con el procedimiento descrito en el capítulo VI.
2. Las simulaciones de los años 1995, 2000, 2005 y 2010, se realizaron empleando imágenes de los satélites LANDSAT 7, LANDSAT 6 LANDSAT 5 y SENTINEL, las bandas espectrales unificadas en el Software QGIS fueron la 3 y 4 correspondientes a las simulaciones 1, 2, 3 y 4.
3. Los cálculos de NDVI se realizaron utilizando el software QGIS, el cual procesó las ecuaciones 1 y 2 para la integración de las bandas utilizadas en cada simulación, sustituyendo la ecuación general por las bandas como se indica a continuación :

Ecuación 1: $\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$ **Sustituyendo**

Ecuación 2:

$$NDVI = \frac{IM4 - IM3}{IM4 + IM3}$$

Los resultados del NDVI se interpretan acorde a los siguientes criterios:

1. Si el NDVI es cercano a -1 indica zonas con presencia de cuerpos de agua.

2. Sí el NDVI es cercano a 1, se tienen zonas con alta vegetación.
3. Sí el NDVI presenta valor de 0, se tiene zonas con alta pérdida de vegetación, terrenos áridos o bien con alto índice de población.

4. Una vez aplicada la ecuación 1, se acota la imagen satelital al tamaño del polígono del sitio de interés (coordenadas WGS 84 UTM 14N), para ello se utilizan los puntos mostrados en el mapa 2, los cuales fueron convertidos a un texto delimitado en Excel, con extensión .txt o .tcl.
5. Estos archivos de Excel se aplican en QGIS, manteniendo uniformidad en las simulaciones.
6. Al primer recorte de extensión se obtienen valores de NDVI procesados por Python en el intervalo de -1 a 1, posteriormente se acota la imagen al polígono de estudio y se procesan estos valores con las curvas de nivel. Su representación gráfica en los resultados obtenidos de la simulación es en un formato de degradado en tonos verdes.
7. Los puntos que delimitan el polígono de estudio son:
 1. San Lorenzo Chiautzingo (elevación de 2,350 msnm)
 2. Huejotzingo (elevación de 2,269 msnm)
 3. Santa Ana Xalmimilulco (elevación de 2,217 msnm)
 4. San Martín Texmelucan (elevación de 2,261 msnm)

8. Considerando los cuatro puntos que delimitan al polígono de estudio y empleando Google Earth, se calcularon las siguientes distancias:

- La distancia del punto 1 (San Lorenzo Chiautzingo) al punto 2 (Huejotzingo) es de 6.12 km como se muestra en la ilustración 14.



Ilustración 14. Perfil de elevación del punto 1 al punto 2, medido en Google Earth.

- La distancia del punto 2 (Huejotzingo) al punto 3 (Santa Ana Xalmimilulco) es de 7.25 km, mostrado en la ilustración 15.

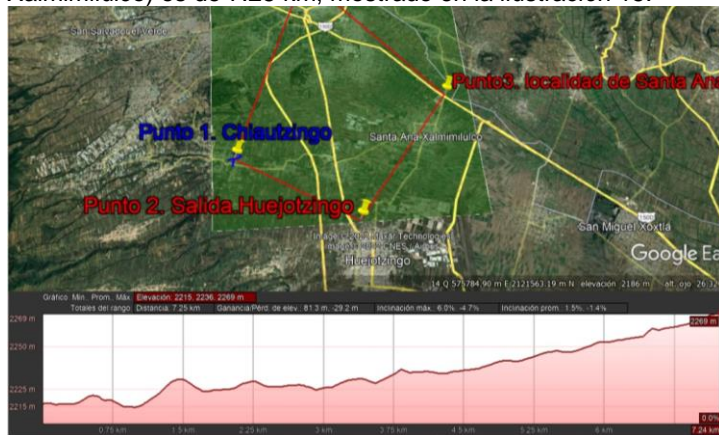


Ilustración 15. Perfil de elevación del punto 2 al punto 3, medido en Google Earth.

- La distancia del punto 3 (Santa Ana Xalmimilulco) al punto 4 (San Martín Texmelucan) es de 10 km, mostrado en la ilustración 16.

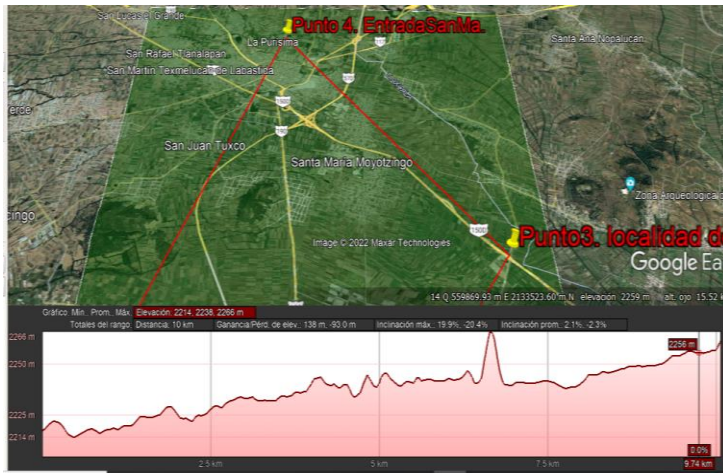


Ilustración 16. Perfil de elevación del punto 3 al punto 4, medido en Google Earth.

- La distancia del punto 4 (San Martín Texmelucan) al punto 1 (San Lorenzo Chiautzingo) es de 11 km mostrada en la ilustración 17. El polígono de estudio tiene un perímetro de 34.37 km y un área de 4, 880.0 km².



Ilustración 17. Perfil de elevación del punto 1 al punto 4, medido en Google Earth.

- Las imágenes satelitales recortadas representan un espacio territorial correspondiente a la zona de interés del presente estudio cuya área calculada por Google Earth es de 144 km², donde se encuentran

primordialmente el cauce del río Atoyac y sus tributarios, mostrado en la ilustración 18.

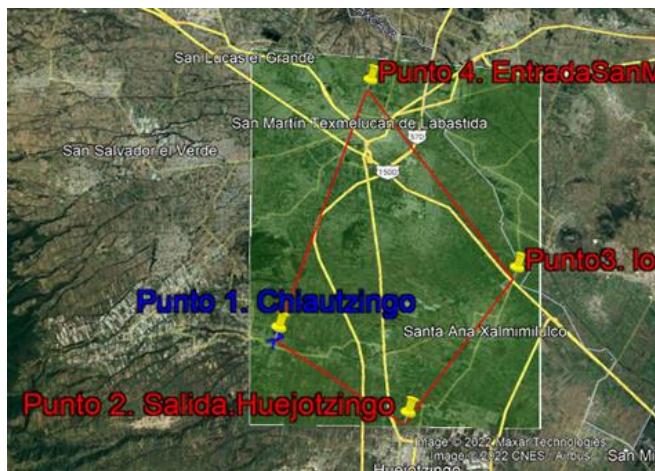
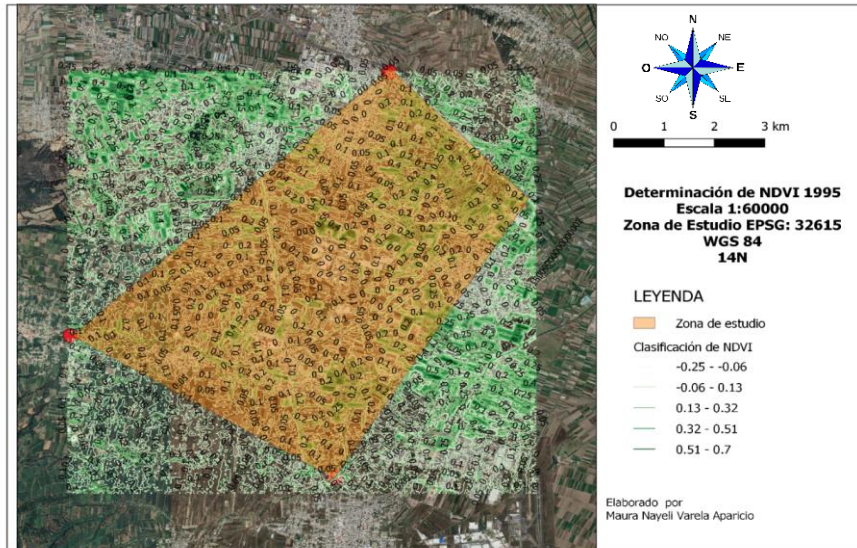


Ilustración 18. Ejemplificación de superposición de imagen satelital y polígono de interés.

9. Una vez establecidas las dimensiones de las imágenes satelitales recortadas sitio interés se especifica en QGIS una curva de nivel filtrada a intervalos de 0.05 metros, por lo que los valores reflejados en las simulaciones son altamente específicos.

VIII. Resultado de las simulaciones en QGIS.

VIII.I Simulación 1: Año de 1995.



Mapa 3. Cálculo de NDVI, año de 1995, realizado en QGIS.

Descripción:

- La zona color verde de mayor intensidad, corresponde a los valores más altos de NDVI (0.25 a 0.7), siendo indicativos claros del proceso de fotosíntesis que caracteriza una alta cobertura vegetal en el sitio, las zonas con tonalidades más claras cercanas al blanco representan los sitios donde existe la presencia de cuerpos de agua, estos datos se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. Concentrado de datos simulación del 1995, realizada en QGIS.

Valores de NDVI imagen recortada	Valores de NDVI con la curva de nivel
-0.2903	-0.25 - -0.06 Zonas con cuerpos de agua
-0.1600	-0.06 - 0.13 Zonas áridas
0.1005	0.13 - 0.32 Zonas con baja densidad de cubierta vegetal
0.3611	0.32 - 0.51 Zonas con densidad media de cubierta vegetal

0.6170	0.51 - 0.7 Zonas con alta densidad de cubierta vegetal
--------	--

Tabla 2. Valores promedio del NDVI año 1995, realizada en QGIS.

Simbología	NDVI mín.	NDVI máx.	Promedio NDVI
Cuerpos de agua	-0.25	-0.06	-0.155
Zonas áridas	-0.061	0.13	0.0345
Densidad baja	0.131	0.32	0.2255
Densidad media	0.321	0.51	0.4155
Densidad alta	0.51	0.7	0.605

Los valores promedio de NDVI son calculados directamente en QGIS y reafirmados en Excel manualmente basados en los valores mínimos y máximos obtenidos después de recortar la imagen satelital y obtener las curvas de nivel.

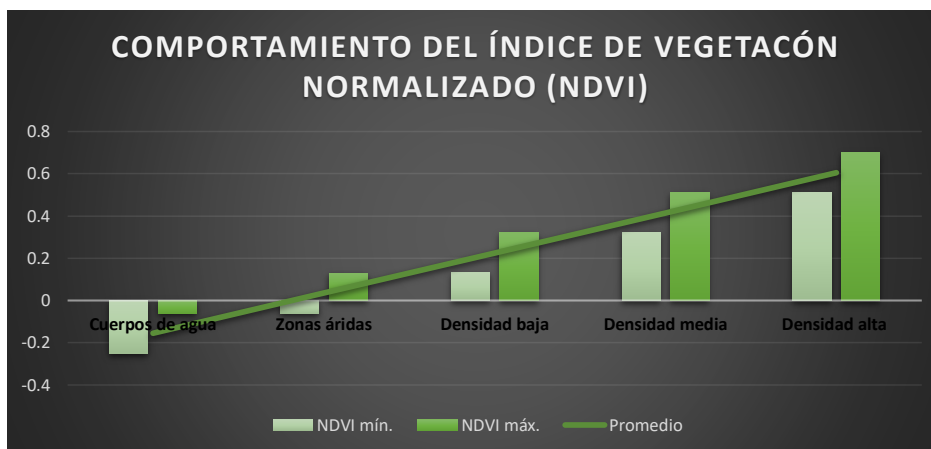
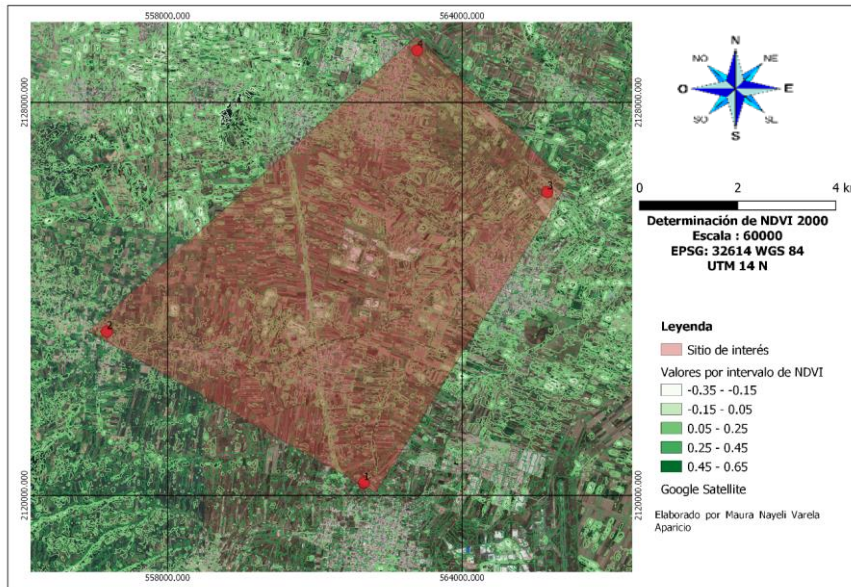


Gráfico 1. Estandarización de los valores del NDVI obtenidos para el año de 1995 a partir de la tabla 2.

El valor promedio de NDVI y la conjugación final de datos por intervalos nos permite evaluar la variación en la cubierta vegetal del polígono de estudio por efecto antropogénico en los años consecutivos.

VIII.II. Simulación 2: Año del 2000.



Mapa 4. Cálculo de NDVI, año 2000 realizado en QGIS.

- La zona de color verde de mayor intensidad corresponde a los valores más altos de NDVI (0.45 a 0.65), siendo indicativos claros del proceso de fotosíntesis que caracteriza una alta cobertura vegetal en el sitio, las zonas con tonalidades más claras cercanas al blanco (-0.35 a -0.15) representan los sitios donde existe la presencia de cuerpos de agua, estos datos se muestran en la tabla 3.

TABLA 3. Concentrado de datos simulación del año 2000, realizada en QGIS.

Valores de NDVI imagen recortada	Valores de NDVI con la curva de nivel.
-0.3823	-0.35 - -0.15 Zonas con cuerpos de agua.
-0.1096	>-0.15 - -0.05 Zonas áridas
0.1631	> 0.05 - 0.25 < Zonas con densidad baja de cubierta vegetal
0.2995	>0.25 - 0.45< Zonas con densidad media de cubierta vegetal
0.6666	> 0.45 - 0.65 Zonas con densidad alta de cubierta vegetal.

Tabla 4. Valores promedio del NDVI año 2000, realizada en QGIS.

Simbología	NDVI mín.	NDVI máx.	Promedio NDVI
Cuerpos de agua	-0.35	-0.15	-0.25
Zona árida	-0.15	0.05	-0.05
Densidad baja	0.05	0.25	0.1505
Densidad media	0.251	0.45	0.3505
Densidad alta	0.451	0.65	0.5505

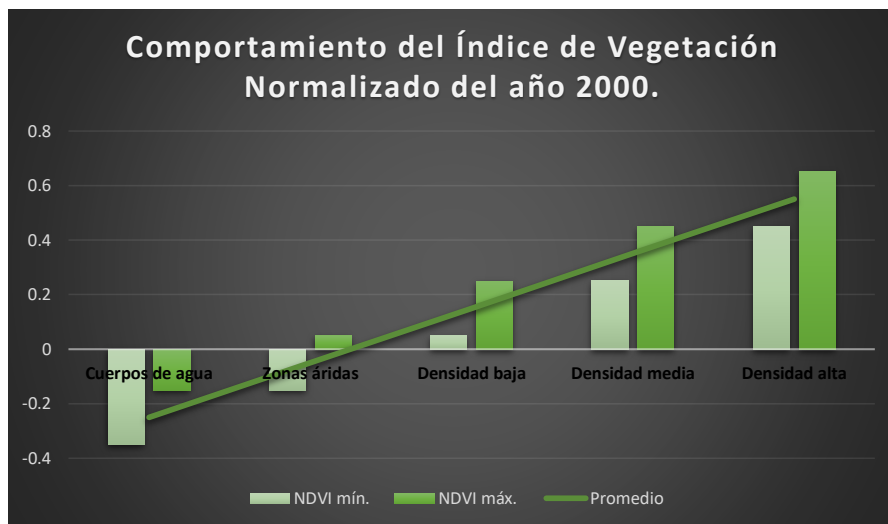
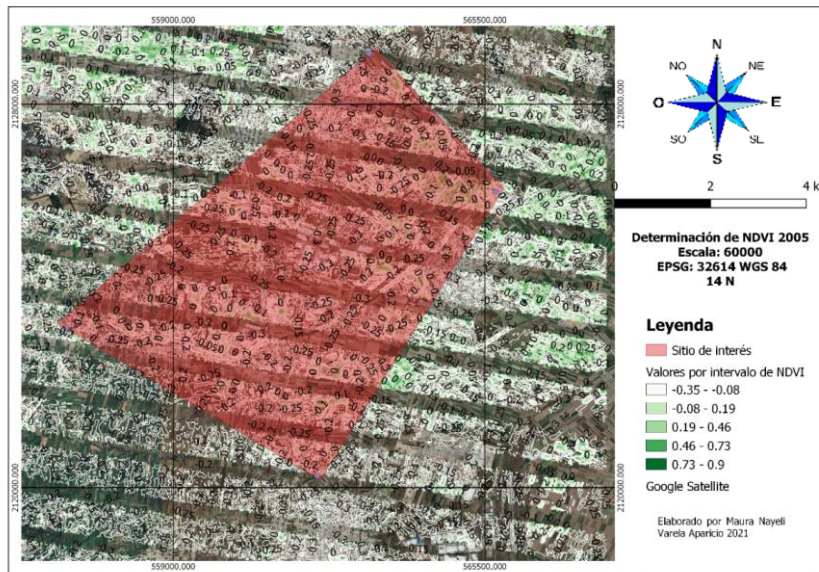


Gráfico 2. Estandarización de los valores obtenidos del NDVI para el año 2000 a partir de la tabla 4.

En el gráfico 2 se puede observar la existencia valores negativos cercanos a cero; por lo que se interpreta un comienzo de pérdida de cobertura vegetal y suelos parcialmente descubiertos con valores entre el rango 0.25 – 0.45 representativos de una densidad media vegetal, esto es, suelos utilizados para agricultura de temporal.

VIII.III. Simulación 3: Año de 2005.



Mapa 5. Cálculo de NDVI, año 2005 realizado en QGIS.

Como se muestra en el Mapa 5 el conjunto de datos relevantes en la zona tiene valores negativos que comienza a alejarse de la unidad negativa (-1), esto representa la disminución en el volumen en los cuerpos de agua en la zona

TABLA 5. Concentrado de datos simulación del año 2005, realizada en QGIS.

Valores de NDVI imagen recortada	Valores de NDVI con la curva de nivel.
-0.3886	-0.35 - -0.08 < Zonas con cuerpos de agua
0.1529	-0.08 – 0.19 Zonas áridas
0.334	> 0.19 – 0.46 < Zonas con densidad baja de cubierta vegetal
0.5139	>0.46 - 0.73 < Zonas con densidad media de cubierta vegetal
0.8611	>0.73 - 0.9 Zonas con densidad alta de cubierta vegetal

Tabla 6. Valores promedio del NDVI año 2005, realizada en QGIS.

Simbología	NDVI mín.	NDVI máx.	Promedio NDVI
Cuerpos de agua	-0.3	-0.08	-0.19
Zonas áridas	-0.08	0.19	0.055
Densidad baja	0.19	0.46	0.325
Densidad media	0.461	0.73	0.595
Densidad alta	0.73	0.9	0.815

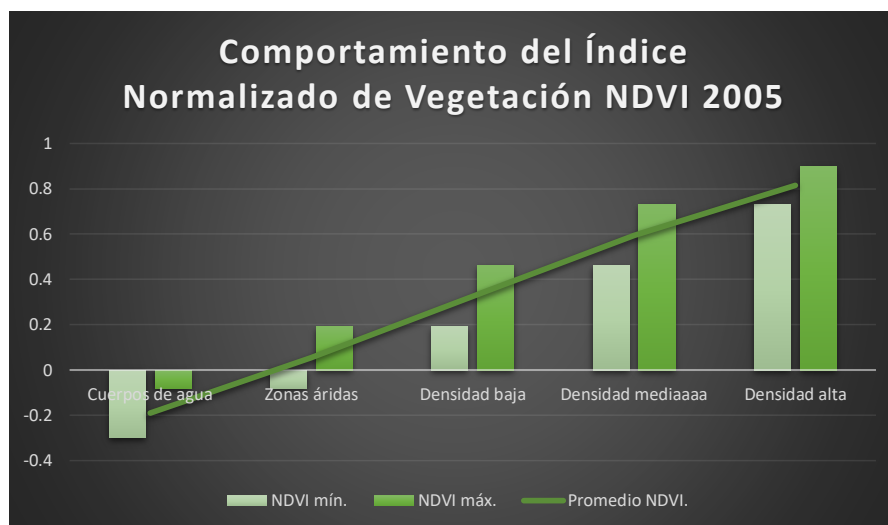
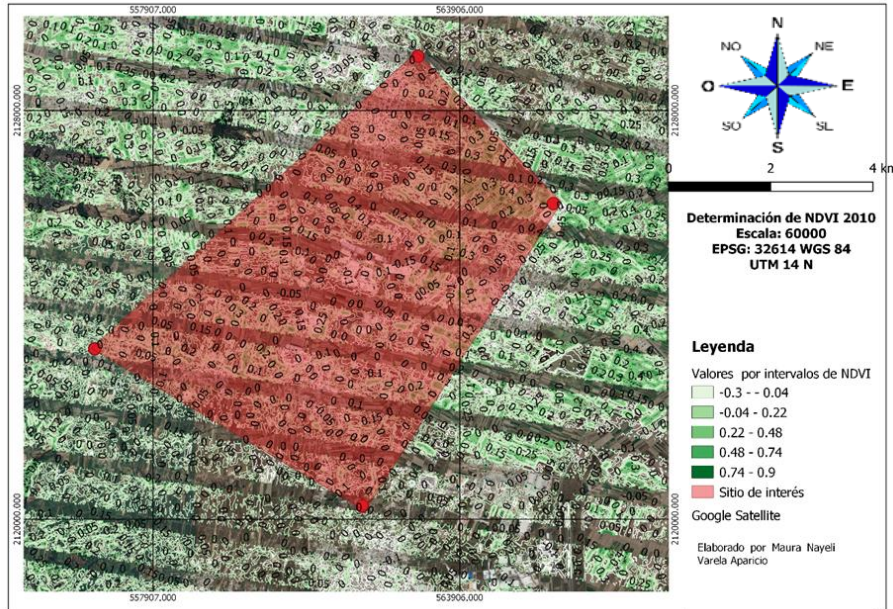


Gráfico 3. Estandarización de los valores obtenidos del NDVI para el año 2005 a partir de la tabla 6.

El análisis de los datos del cálculo de NDVI nos arrojan valores que se alejan del -1, es decir una menor reflectancia de los cuerpos de agua y valores más acercados al 0 definen las zonas áridas con cambios de uso de suelo o bien presencia de zonas habitacionales, aquellos valores que sobre pasan 0.5 son zonas donde puede existir pastizales y el valor más alto al 0.73 es decir una densidad alta de vegetación en el área.

VIII. IV. Simulación 4: Año de 2010.

Los valores observados en el mapa 4 muestran similitud a los valores obtenidos en 2005, lo que nos hace visualizar una pérdida mínima en la cubierta vegetal del sitio.



Mapa 6. Cálculo de NDVI año 2010, realizado en QGIS.

TABLA 7. Concentrado de datos simulación del año 2010, realizada en QGIS.

Valores de NDVI imagen recortada	Valores de NDVI con curva de nivel.
-0.3356	-0.33 - -0.04 Zonas con cuerpos de agua
0.0116	> -0.04 - 0.22 < Zona áridas
0.3588	> 0.22 - 0.48 < Zonas con densidad baja de cubierta vegetal
0.5325	>0.48 - 0.74 < Zonas con densidad media de cubierta vegetal
0.8664	>0.74 - 0.9 Zonas con densidad alta de cubierta vegetal

Tabla 8. Valores promedio del NDVI año 2010, realizada en QGIS.

Simbología	NDVI mín.	NDVI máx.	Promedio NDVI
Cuerpos de agua	-0.33	-0.04	-0.17
Zona árida	-0.04	0.22	0.0895
Densidad baja	0.221	0.48	0.3505
Densidad media	0.481	0.74	0.6105
Densidad alta	0.741	0.9	0.7705

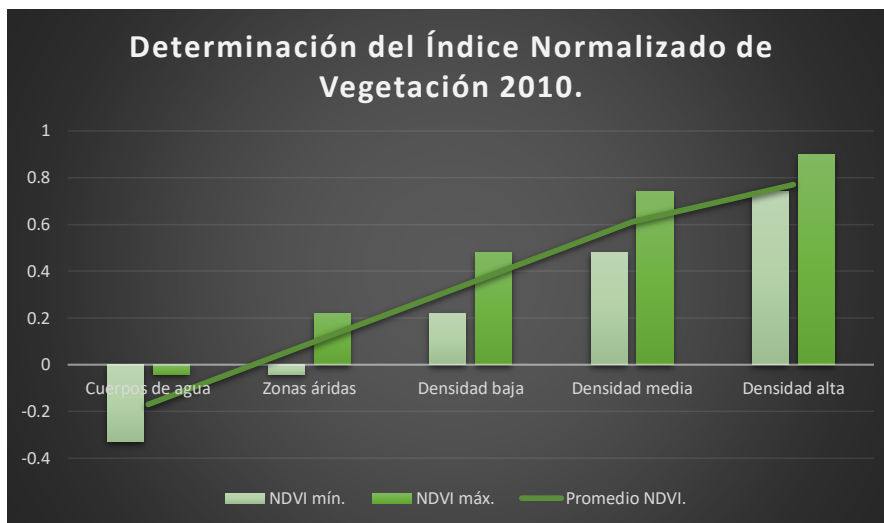


Gráfico 4. Estandarización de los valores del NDVI del año 2010 a partir de la tabla 8.

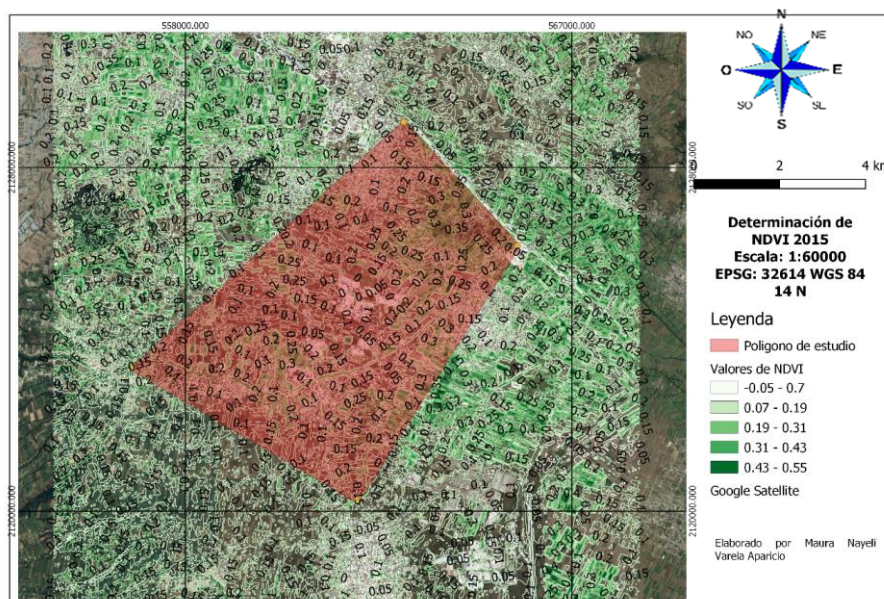
El análisis de los datos obtenidos en la simulación del año 2010 refleja una gran dispersión de valores, esto debido a las condiciones climáticas, sobre todo de alta humedad, que prevalecieron cuando fueron tomadas las imágenes satelitales en el mes de febrero, haciendo mención que todas las imágenes trabajadas tienen un rango de 3 meses.

Los valores positivos del NDVI en esta simulación se encuentran en el rango de 0.35 a 0.65 lo que indica una disminución de reflectancia de la cubierta vegetal y nos lleva a deducir un crecimiento de zonas urbanas mientras que la cantidad de valores del NDVI negativos se acercan al 0, nos indican una disminución en los cuerpos de agua directamente influenciado por el cambio en el uso del suelo en el polígono de estudio. En resumen, se tiene una disminución de la cubierta vegetal y cuerpos de agua dentro del polígono de estudio, en comparación a la simulación correspondiente al año 2000.

VIII.V. Simulación 5: Año de 2015.

Las imágenes satelitales obtenidas del conjunto de datos GEOTIFF descargados pertenecen al satélite LANDSAT 8 ya que, como se hace mención en el capítulo V.III.I denominado Imágenes del Satélite LANDSAT, a partir del 2013 todas las imágenes registradas tienen 11 bandas, de las cuales para fines de esta investigación utilizamos la banda 5 con reflectividad en el infrarrojo cercano y la banda 4 con reflectividad en el rojo, especificado este cambio se presenta a continuación el análisis de datos procesados en el software QGIS.

Utilizando la ecuación 1 descrita con anterioridad se sustituyen las bandas correspondientes teniendo lo siguiente :



Mapa 7. Cálculo de NDVI, año 2015 realizado en QGIS.

En el Mapa 7 se puede observar que los valores negativos son próximos al cero, el valor mínimo de NDVI obtenido es de -0.05 el cual ya no es representativo de los cuerpos de agua, si no de zonas áridas, el valor de NDVI máximo es de 0.55 el cual nos representa una cubierta vegetal medio y nos lleva a la conclusión de que existe una pérdida de cubierta vegetal en la zona de estudio.

A continuación, se muestran en las tablas (10, 11 y el gráfico 5).

Tabla 10. Concentrado de datos simulación de 2015, realizado en QGIS.

Valores de NDVI imagen recortada	Valores de NDVI con curva de nivel.
-0.05	-0.05 – 0.07 Cuerpos de Agua
0.0741	> 0.074 - 0.19 < Zona árida
0.1945	> 0.19 – 0.31 < Densidad baja
0.3145	>0.31 - 0.43 < Densidad media
0.553	>0.43 – 0.55 Densidad alta

Tabla 11. Valores promedio de NDVI año 2015, realizado en QGIS.

Simbología	NDVI mín.	NDVI máx.	Promedio NDVI
Cuerpos de agua	-0.05	0.07	0.01
Zona árida	0.071	0.19	0.1305
Densidad baja	0.191	0.31	0.2505
Densidad media	0.312	0.43	0.371
Densidad alta	0.43	0.55	0.4905

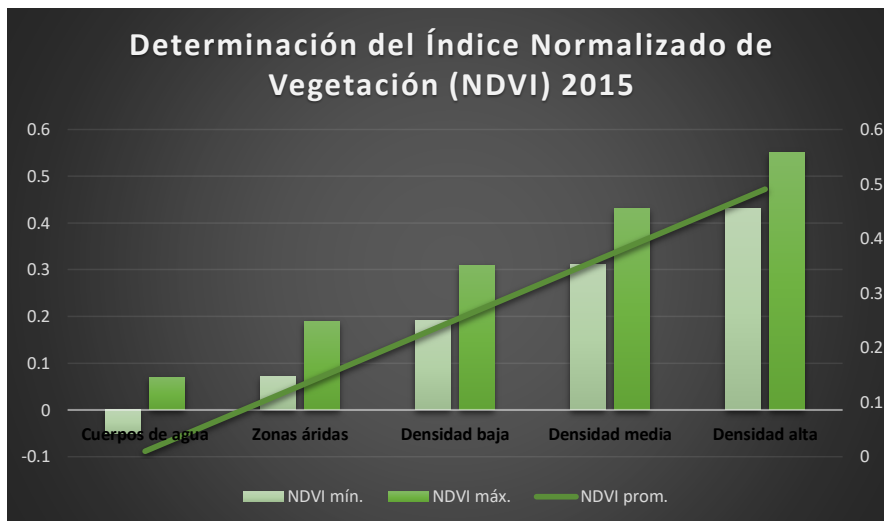
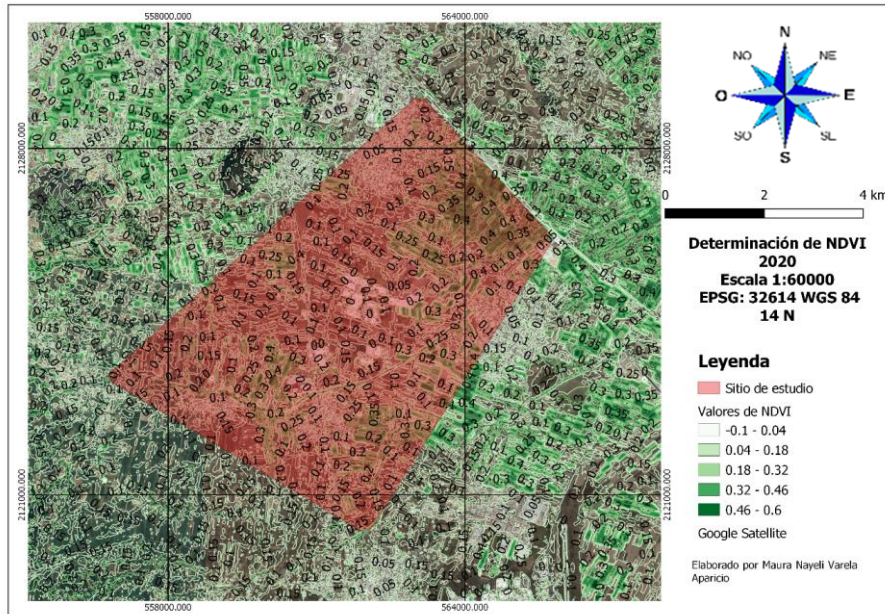


Gráfico5. Estandarización de valores del NDVI del año 2015 a partir de la tabla 11.

Los resultados obtenidos de NDVI para el año 2015, que fluctúan en el rango de – 0.074 a 0.31 representativos de zonas áridas y con cubierta vegetal en densidad baja.

VIII.VI. Simulación 6: Año de 2020.



Mapa 8. Cálculo de NDVI, año 2020, realizado en QGIS.

- La zona que resalta en color verde de mayor intensidad, corresponde a los valores de una cubierta vegetal media (0.32 a 0.6), siendo indicativos claros de una disminución del proceso de fotosíntesis que caracteriza una alta cobertura vegetal en el sitio, las zonas con tonalidades más claras cercanas al blanco representan los sitios donde el rango de valores de NDVI inicia en -0.1 a 0.18 los cuales son representativos de zonas áridas o bien suelos descubiertos que ya no tienen reflectancia..

TABLA 12. Concentrado de datos simulación del año 2020, realizada en QGIS.

Valores de NDVI imagen recortada	Valores de NDVI con curva de nivel.
-0.1362	-0.1 . -0.04 < Zonas con cuerpos de agua
0.0631	> -0.04 - 0.18 < Zonas áridas
0.2663	>0.18 - 0.32 < Zonas con densidad baja en cubierta vegetal
0.3623	>0.32 - 0.46 < Zonas con densidad media en cubierta vegetal

0.6308	> 0.46 – 0.6 Zonas con densidad alta en cubierta vegetal
--------	--

Tabla 13. Valores promedio de NDVI de año 2020.

Simbología	NDVI min.	NDVI máx.	Promedio NDVI
Cuerpos de agua	-0.1	0.039	-0.0305
Zona árida	0.04	0.18	0.110
Densidad baja	0.181	0.32	0.2505
Densidad media	0.321	0.46	0.371
Densidad alta	0.461	0.6	0.4905

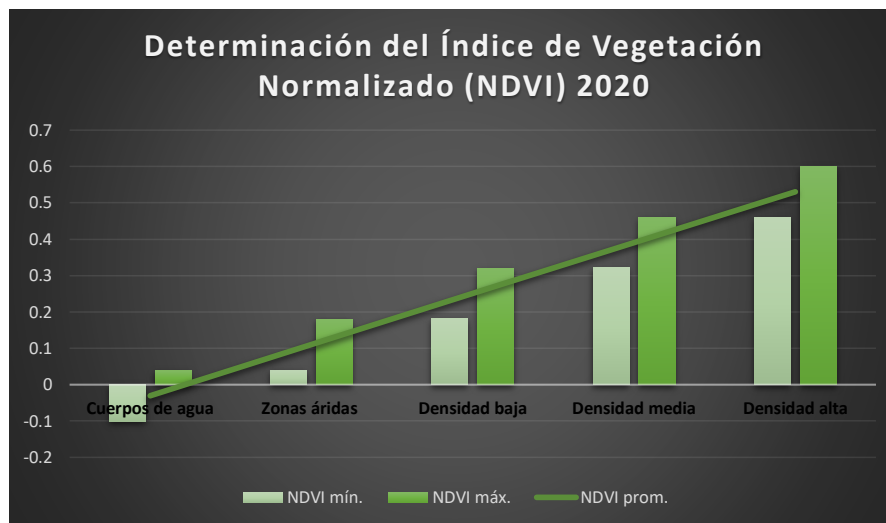
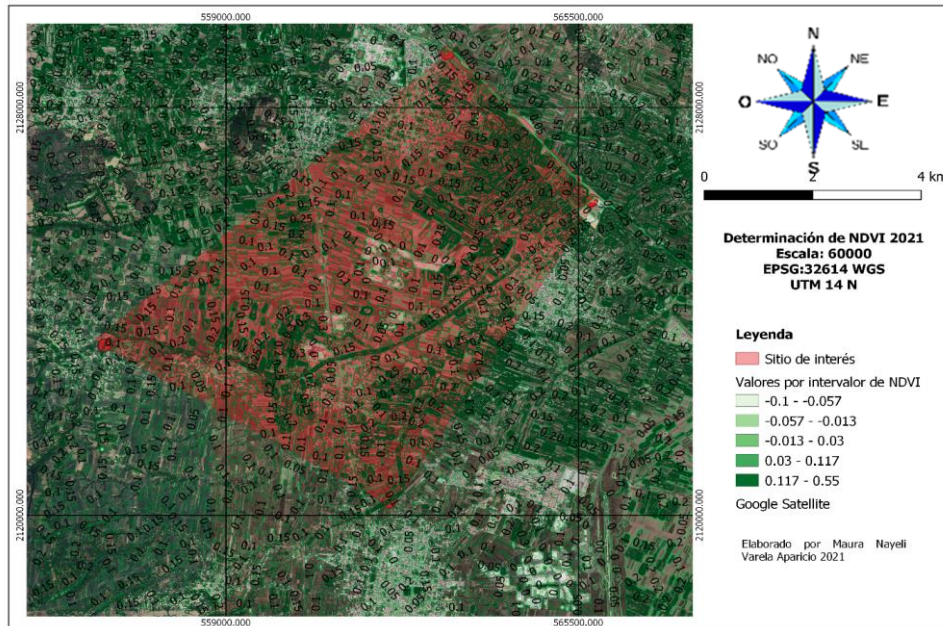


Gráfico 6. Estandarización de valores del NDVI del año 2020 a partir de la tabla 13.

Los valores de NDVI obtenidos para la simulación 2020 fluctúan en un rango de -0.04 a 0.32 siendo estos representativos de zonas áridas y zonas con baja densidad vegetal, el valor de NDVI máximo obtenido es de 0.49 el cual nos representa zonas con densidad media y la desaparición de cubierta vegetal.

VIII. VII. Simulación 7: Año de 2021.



Mapa 9. Cálculo de NDVI, año 2021 realizado en QGIS.

Tabla 14. Concentrado de datos simulación de 2021, realizado en QGIS.

Valores de NDVI imagen recortada	Valores de NDVI con curva de nivel
-0.1032	-0.1 - -0.057 < Zonas con cuerpos de agua
-0.0723	> -0.057 - -0.013 < Zonas áridas
0.2479	>-0.013 a 0.03 < Zonas con densidad baja en cubierta vegetal
0.3357	>0.03 a 0.117 < Zonas con densidad media en cubierta vegetal
0.5046	>0.117 a 0.55 Zonas con densidad alta en cubierta vegetal

Tabla 15. Valores promedio de NDVI año 2021, realizado en QGIS.

Simbología	NDVI mín.	NDVI máx.	NDVI prom.
Cuerpos de agua	-0.1	-0.057	-0.0785
Zona árida	-0.0571	-0.013	-0.03505
Densidad baja	-0.0131	0.03	0.00845
Densidad media	0.031	0.117	0.074
Densidad alta	0.117	0.55	0.3335

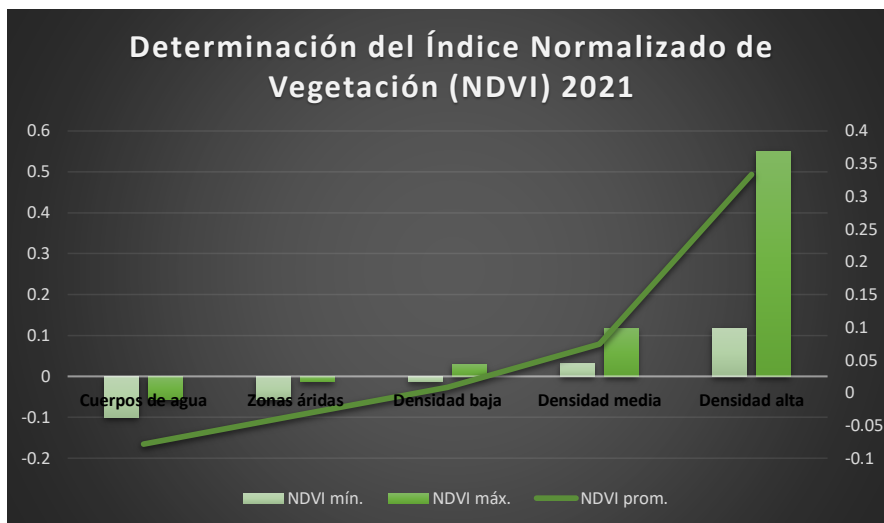


Gráfico 7. Estandarización de los valores del NDVI del año 2021 a partir de la tabla 14.

Los valores de NDVI obtenidos para la simulación 2021 fluctúan en un rango de -0.057 a 0.17 siendo estos representativos de zonas áridas y zonas con baja densidad vegetativa, el valor de NDVI máximo obtenido es de 0.55 el cual nos representa zonas con densidad media y la desaparición de cubierta vegetal. El valor negativo ya no es representativo de los cuerpos de agua por lo que se deduce la reducción o desaparición de estos.

VIX. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Tabla 16. Valores promedio de NDVI de los años 1995 – 2000.

Simbología	NDVI promedio 1995	NDVI promedio 2000
Cuerpos de agua	-0.155	-0.025
Zona árida	0.0345	-0.05
Densidad baja	0.2255	0.1505
Densidad media	0.4155	0.3505
Densidad alta	0.605	0.5505

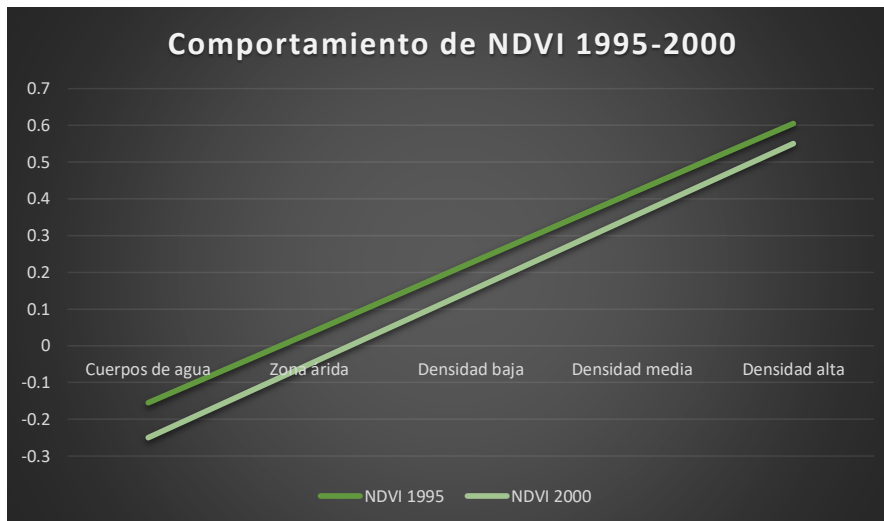


Gráfico 8. Valores comparativos de NDVI 1995- 2000.

Considerando el año 1995 como el año de inicio de estudio, los valores promedio de NDVI obtenidos nos muestran un balance entre el valor medio que representan cuerpos de agua (-0.25) y el valor promedio de densidad alta (0.55) , estos valores decrecen en 5 años, lo que se identifica como una disminución en la cubierta vegetal de la zona, en 1995 se tuvo un NDVI promedio máximo de 0.60 mientras que en el año 2000 se obtuvo un promedio máximo de 0.55.

Tabla 17. Valores promedio de NDVI de los años 2000 – 2005.

Simbología	NDVI promedio 2000	NDVI promedio 2005
Cuerpos de agua	-0.25	-0.19
Zona árida	-0.05	0.055
Densidad baja	0.1505	0.325
Densidad media	0.3505	0.595
Densidad alta	0.5505	0.815

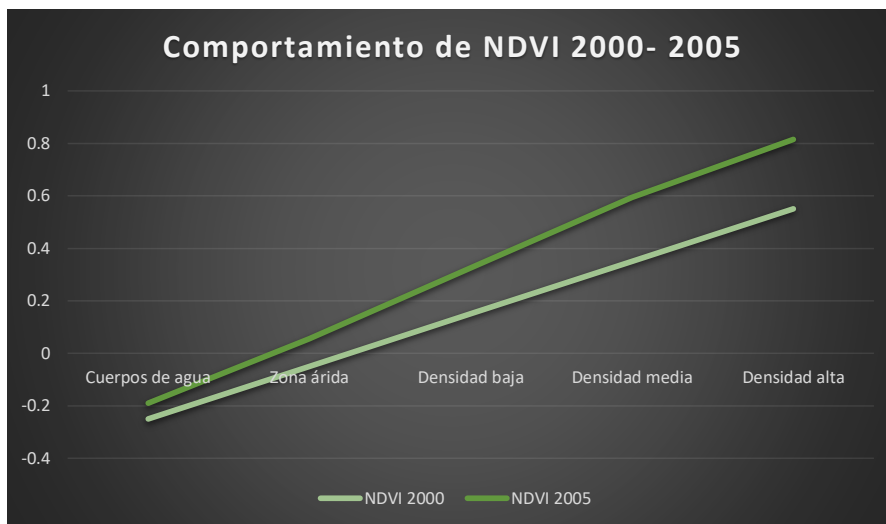


Gráfico 9. Valores comparativos de NDVI de los años 2000- 2005.

Debido a lo especificado en la simulación de las imágenes satelitales obtenidas para la simulación del año 2005, que tienen una nubosidad del 20%, este factor de humedad ocasiona un incremento aparente en los valores de NDVI. Estos periodos de alta nubosidad son correspondientes a los periodos de precipitación en la zona lo que favorece la aparición de cuerpos de agua temporales e incremento en el caudal de los ríos.

Tabla 18. Valores promedio de NDVI de los años 2005 - 2010.

Simbología	NDVI promedio 2005	NDVI promedio 2010
Cuerpos de agua	-0.19	-0.17
Zona árida	0.055	0.0895
Densidad baja	0.325	0.3505
Densidad media	0.595	0.6105
Densidad alta	0.815	0.77

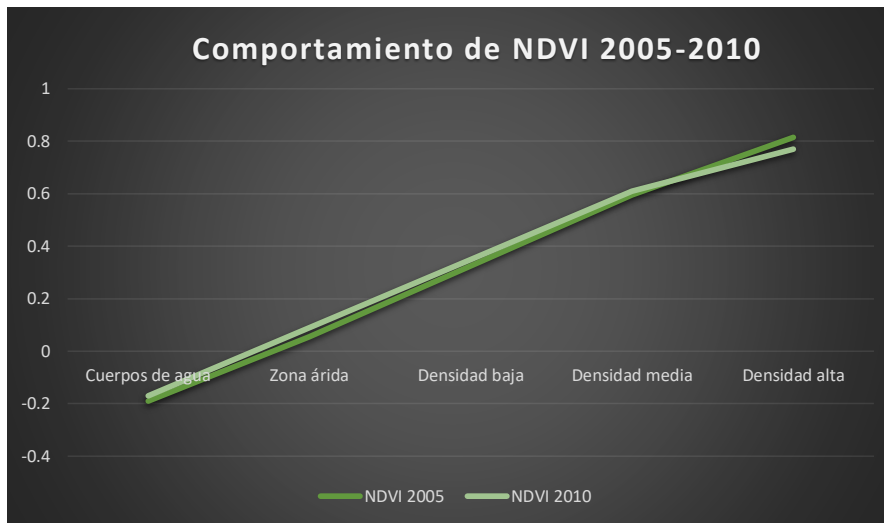


Gráfico 10. Valores comparativos del NDVI de los años 2005 – 2010.

El comportamiento de los valores de los años 2005- 2010 indican una pérdida de cubierta vegetal, pues pasaron de 0.81 a 0.77 respectivamente.

Tabla 18. Valores promedio de NDVI de los años 2010 – 2015.

Simbología	NDVI promedio 2010	NDVI promedio 2015
Cuerpos de agua	-0.17	0.01
Zona árida	0.0895	0.1305
Densidad baja	0.3505	0.2505
Densidad media	0.6105	0.371
Densidad alta	0.77	0.4905

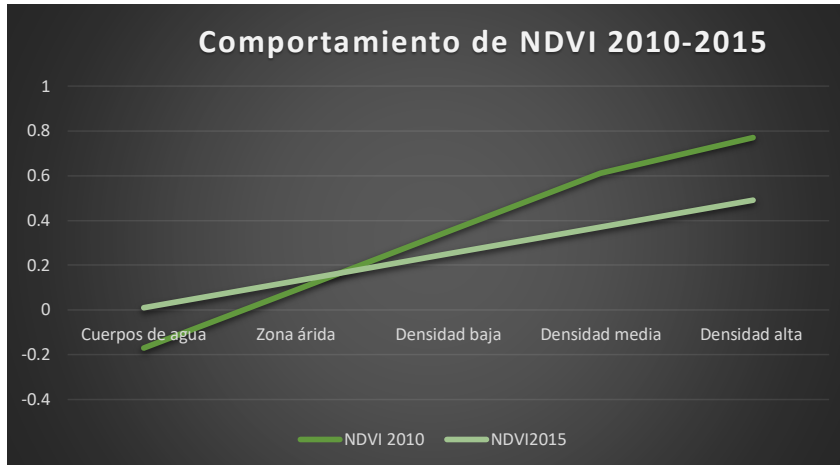


Gráfico 11. Valores comparativos del NDVI de los años 2010 – 2015.

Los valores de NDVI promedio para el año 2015 (0.49) caracterizan baja actividad fotosintética en el polígono de estudio indicativo claro de pérdida de cubierta vegetal respecto al 2010 que tuvo una disminución de (0.281). Lo anterior se ve corroborado por los valores obtenidos de 0.08 para el año 2010 y 0.0130 para el año 2015 que corresponden a la presencia de zonas áridas.

Tabla 19. Valores promedio de NDVI de los años 2015 y 2020.

Simbología	NDVI promedio 2015	NDVI promedio 2020
Cuerpos de agua	0.01	-0.0305
Zona árida	0.1305	0.110
Densidad baja	0.2505	0.2505
Densidad media	0.371	0.371
Densidad alta	0.4905	0.4905

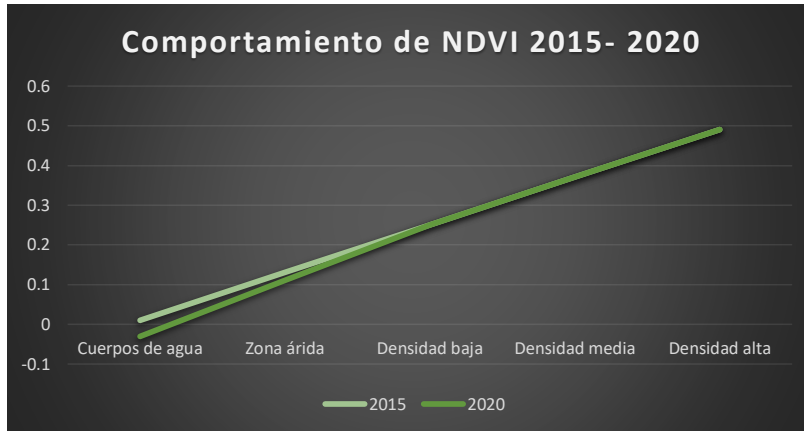


Gráfico 12. Valores comparativos del NDVI de los años 2015 – 2020.

Los datos nos muestran un aumento de zonas áridas (-0.03) esto ocasionado por el cambio en el uso de suelo y la disminución y/o pérdida en los cuerpos de agua.

Tabla 20. Valores promedio de NDVI de los años 2015 y 2021.

Simbología	NDVI promedio 2015	NDVI promedio 2021
Cuerpos de agua	0.01	-0.0785
Zona árida	0.1305	-0.03505
Densidad baja	0.2505	0.00845
Densidad media	0.371	0.074
Densidad alta	0.4905	0.3335

La media aritmética de NDVI correspondiente al año 2015 (0.49), nos indica la presencia de zonas con baja densidad vegetativa y zonas áridas, el NDVI calculado para el año 2021, tuvo un valor de (0.3335), indicativo de una disminución de cubierta vegetal y aumento de zonas áridas (decreció 0.156), como se muestra a continuación en el gráfico 13.

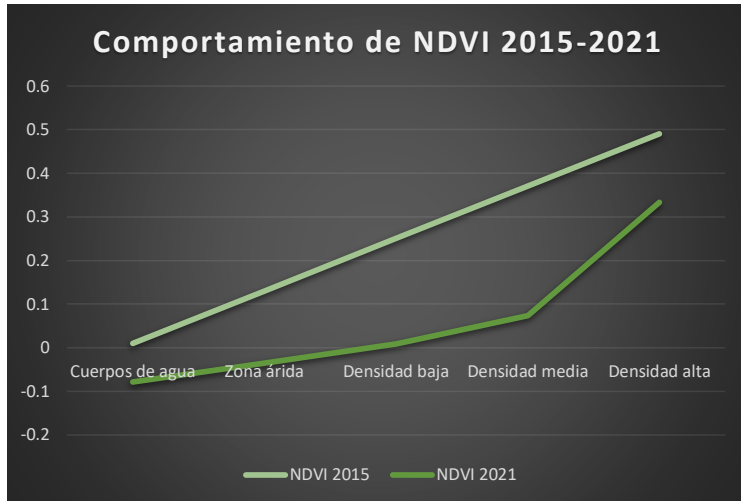
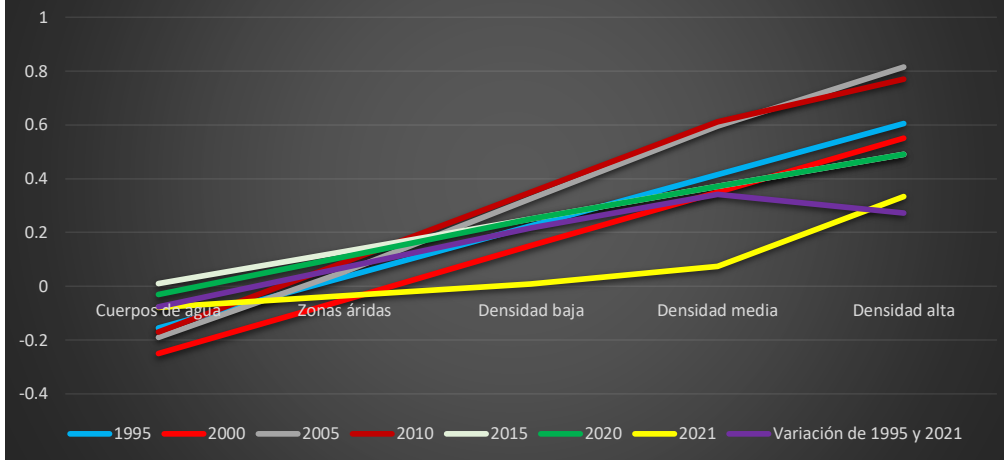


Gráfico 13. Valores comparativos del NDVI de los años 2015 – 2021.

Tabla 21. Comportamiento General de NDVI 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020, 2021.

Área/ Año	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	Variación de 1995 y 2021	Porcentaje %
Cuerpos de agua	-0.155	-0.25	-0.19	-0.17	0.01	-	-	-0.0765	50.6451613
Zonas áridas	0.0345	-0.05	0.055	0.0895	0.1305	0.11	-0.035	0.0695	101.449275
Densidad baja	0.2255	0.1505	0.325	0.3505	0.2505	0.2505	0.0084	0.2171	3.72505543
Densidad media	0.4155	0.3505	0.595	0.6105	0.371	0.371	0.074	0.3415	17.8098676
Densidad alta	0.605	0.5505	0.815	0.77	0.4905	0.4905	0.3335	0.2715	55.1239669

Comportamiento General de NDVI (1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020.)



Del análisis de la tabla 21 y la gráfica 13 se obtiene lo siguiente

Cuerpos de agua: Para el año de 1995 se tiene un valor de -0.155, el correspondiente para el año de 2021 fue de -0.078, la variación entre ambos fue de -0.076. Esta variación nos indica una pérdida en los cuerpos de agua.

Zonas áridas: Para el año de 1995 se tiene un valor de 0.0345, el correspondiente para el año de 2021 fue de (-0.0785), la variación entre ambos valores de NDVI fue de 0.0695. Esta variación nos indica un crecimiento en suelos descubiertos convirtiéndose en zonas áridas, siendo una de las principales causas, el cambio de uso de suelo en la zona.

Zonas con baja densidad vegetativa: Para el año 1995 se tiene un valor de 0.225, el correspondiente para el año 2021 fue de 0.008, la variación entre ambos valores de NDVI fue de 0.2171. Esta variación nos indica una disminución de reflectividad ocasionada por la presencia con baja densidad vegetal.

Zonas con densidad media vegetal: Para el año 1995 el valor de NDVI promedio es de 0.415, el correspondiente para el año 2021 fue de 0.074, la variación de estos valores fue de 0.3415. Esta variación nos indica pérdida de cubierta vegetal en el polígono.

Zonas con densidad alta: Para el año 1995 el valor de NDVI promedio es de 0.605, el correspondiente para el año 2021, fue de 0.335, la variación de estos valores fue de 0.2715. Esta variación nos indica una baja actividad fotosintética provocada por la pérdida de cubierta vegetal.

X. CONCLUSIONES

En este trabajo se calculó el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), a partir de imágenes tomadas por los satélites LANDSAT 7, LANDSAT 8 y SENTINEL. Estas imágenes satelitales se descargaron de la plataforma GLOVIS del Sistema Nacional Geológico de Estados Unidos.

El NDVI es el índice adecuado para el seguimiento global de la vegetación ya que ayuda a identificar y compensar cambios en las condiciones de iluminación, la pendiente de la superficie sobre la cual se asientan las plantas, exposiciones y otros factores externos.

En nuestro caso el NDVI fue utilizado para determinar la pérdida de drenajes en la cuenca alta del "alto Atoyac", se tuvo un área total de imágenes de 144 km² y un polígono de interés 4, 880 km².

Aplicando estos valores de NDVI obtuvimos lo siguiente:

- Drenajes naturales se calculó una pérdida del 50.64 %
- Cuerpos de Agua: Se calculo una variación negativa de 50.64% de pérdida en el polígono de estudio.
- Zonas áridas: Se calculo un incremento porcentual del 101.5%
- Zonas de baja densidad de cubierta vegetal: Se calculó un incremento del 3.72%
- Zonas de densidad media de cubierta vegetal del 17.80 %
- Zonas con alta densidad de cubierta vegetal: se calculó una pérdida del 55.12 %.

En función de los valores citados anteriormente tenemos que en el periodo espacio - tiempo de 1995 a 2021 la parte alta de la cuenca de río Atoyac presenta altos índices de degradación ambiental, la pérdida de cubierta vegetal aunada a la desaparición de los drenajes naturales motivados por el cambio en el uso de suelo colocan a este espacio geográfico en un alto riesgo ambiental e hídrico, los efectos en salud, aprovechamiento de recursos y calidad de vida de los habitantes se están dejando sentir en el área.

Mientras que los valores representativos en los cuerpos de agua muestran un deterioro del 50.64%, la pérdida de los drenajes naturales por los cuales llevan el cauce del río son también parte de esta pérdida, tomemos en cuenta que estos cauces del alto Atoyac tenían usos de agricultura y humano, sin embargo, al encontrarse en carencia en la actualidad podremos expresarlo como un estrés hídrico en la zona.

Los resultados de esta investigación sientan la base a los diferentes niveles de gobierno para el establecimiento de programas de manejo y rescate de los componentes naturales de la cuenca alta del río Atoyac, esto con el objetivo de garantizar la seguridad hídrica y alimentaria de sus habitantes.

Este proyecto de investigación forma parte de la propuesta denominada Decreto presidencial para la restauración ecológica de la cuenca del alto Atoyac "Puebla – Tlaxcala", el cual considera los subsistemas agua, aire, restauración ecológica del suelo, caracterización de la biodiversidad, actualización del ordenamiento ecológico y marco legal, residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Así mismo se integran los ejes transversales: salud, derechos humanos cambio climático y rescate integral. La presentación de estos datos ayuda a las instituciones gubernamentales a tener un panorama sobre los sitios de investigación y su situación actual por pérdida del drenaje natural del río así mismo los asentamientos humanos a los que se les atribuye la pérdida de cubierta vegetal y de los cuerpos de agua en la zona.

Este proyecto abre la puerta a líneas de investigación futuras, es importante la educación ambiental para la conservación de las zonas con alta cubierta vegetal que nos permitan cumplir con su función en el ciclo hídrico, trabajar en la recuperación de la densidad vegetativa en la zona es también trabajar en la recuperación del río Atoyac desde la parte alta.

X.I. BIBLIOGRAFÍA

1. Organización de las Naciones Unidas, UNICEF 2018, Sistemas de Saneamiento, Sitio Web Mundial, 2018, página 1.
2. Organización de las Naciones Unidas (14 de junio 2019), Datos y Cifras, sitio web Mundial, OMS, 2019, página 1.
3. Gobierno del Distrito Federal, Universidad Autónoma de México, Cecilia Conde. (2006). México y el Cambio Climático Global. Dirección General de Divulgación de la Ciencia: ISA Corporativo. <http://132.248.66.7/bitstream/handle/123456789/703/clima.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Repositorio
4. D.G.S.M.O (2009) Estudio para Estimar los Beneficios Ecológicos del Proyecto Integral para el Saneamiento del Alto Atoyac en el Estado de Puebla. [http://www.ampres.com.mx/assets/estudio_beneficios_atoyac-\(act-06abr10\).pdf](http://www.ampres.com.mx/assets/estudio_beneficios_atoyac-(act-06abr10).pdf)
5. Gobierno del Distrito Federal, Universidad Autónoma de México, Cecilia Conde. (2006). México y el Cambio Climático Global. Dirección General de Divulgación de la Ciencia: ISA Corporativo. <http://132.248.66.7/bitstream/handle/123456789/703/clima.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Repositorio
6. Organización de las Naciones Unidas. (2019). Agua y Salud. 29 de enero 2020, de OMS, UNICEF Sitio web: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). Innovation at FAO. 29 enero 2020, de Sustentabilidad Sitio web: 9. <http://www.fao.org/sustainability/es/>.
8. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INEEC, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Daniel Iura González Terrazas, Anaïs Vermonden Thibodeau, Raquel Teresa Montes Rojas, Yusif Salib Nava Assad, Fanny López Díaz, Fabiola Gress Carrasco, Marcia Rojas Barajas, Marco Antonio Linares Munguía, José Machorro Reyes y Carlos Enríquez Guadarrama. (Primera Edición 2019). Capítulo 5 "Vulnerabilidad de los Asentamientos Humanos por Inundaciones". Atlas de Vulnerabilidad al Cambio Climático México (33). Hecho en México: Quinta del Agua.
9. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua & SEMARNAT. (2019). INFORME ANUAL 2020. (pág. 22,53) http://atl.org.mx/agua/informe_anual_2020.pdf
10. SINA, Conagua. Ciclo hidrológico. Conagua. Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cicloHidrologico&ver=reporte>. Fecha de consulta: septiembre 29, 2020. (<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>)

11. Agua, I. M. D. T. (2019). El acaparamiento del agua: un problema global. gob.mx. <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-acaparamiento-del-agua-un-problema-global?idiom=es>
12. Sociedad Geográfica de Lima. (2011) ¿Qué es una cuenca hidrológica? https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
13. Inhalt. (2015). GWP – Gesellschaft. Wirtschaft. Politik, 64(1), 2-3. https://doi.org/10.3224/gwp.v64i1.18249file:///E:/TESIS%202020/Dcs%20ref/cuenca_hidrologica.pdf
14. Proyecto de desarrollo agropecuario, Valle Grande- Santa Cruz Bolivia. “Estudio Hidrológico preliminar de las cuencas hidrográficas de la provincia de Vallegrande, volumen, file:///C:/Users/maura/Downloads/morfologia%20del%20drenaje.pdf (pp. 5)
15. Libro contradicciones, fundamentos en CONAGUA 2010, pp 48.
16. Asociación Mexicana de Hidráulica, Centro Virtual de información del Agua 2017, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2020).
17. ([https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos#:~:text=Las%20cuencas%20y%20acu%C3%ADferos%20del%20pa%C3%ADs&text=Las%20cuencas%20se%20agrupan%20en,hidrol%C3%B3gico%20Administrativas%20\(RHA\)](https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos#:~:text=Las%20cuencas%20y%20acu%C3%ADferos%20del%20pa%C3%ADs&text=Las%20cuencas%20se%20agrupan%20en,hidrol%C3%B3gico%20Administrativas%20(RHA))) “Tablero SINA: Ríos principales” <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=riosPrincipales&ver=mapa>, CONAGUA, Acciones y Programas.
18. Conagua. Estadísticas del Agua en México. Ediciones 2006 - 2008, 2010, 2011, 2013-2015. Conagua. México. 2006-2008, 2010, 2011, 2014-2017. SINA, Conagua. Registro Público de Derechos de Agua (REPGA). Volúmenes Inscritos (regional). Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=usosAgua&ver=reporte&o=0&n=regional>. Fecha de consulta: septiembre 2020, año de publicación julio 2018.
19. Universidad Nacional Autónoma de México. (2017). CONTAMINACIÓN, ECOLOGÍA POLÍTICA Y SUJETOS RURALES EN NATIVIDAD, TLAXCALA [Libro electrónico]. En P. Velasco Santos (Ed.), RÍOS DE CONTRADICCIÓN: Vol. Primera edición (pp. 48-50). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, 04510. Instituto de Investigaciones Antropológicas. <https://www.ii.unam.mx>
20. Vive Atoyac, ubicación, sitio web.
21. González Jácome, A. & Universidad Iberoamericana Ciudad de México. (2009). El Control del Agua en la Cuenca de los Ríos Atoyac y Zahuapan por el Estado Mexicano Posrevolucionario (1.ª ed., Vol. 8) [Libro electrónico]. Anduli · Revista Andaluza de Ciencias Sociales. https://www.researchgate.net/publication/28316225_El_Control_del_Agua_en_la_

Cuenca_de_los_Rios_Atoyac_y_zahuapan_por_el_Estado_Mexicano_Posrevolucionario

22. Glosario CONAPO. (2019). Gobierno de México. http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Glosario_Migracion_Interna?page=5
23. SEMARNAT (2019) ¿Qué son las cuencas hidrológicas y las reservas de agua? <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-son-las-cuencas-hidrologicas-y-las-reservas-de-agua>
24. Diario Oficial de la Federación, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de Aguas Nacionales Superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas, Artículo único.
25. Dale la cara al Atoyac (2015). Infogramas- Observatorio- <http://www.dalelacara.org/observatorio/infografias>
26. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3586/358649676011/html/index.html> (Chávez-Cortés, M. M. (2016). Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3586/358649676011/html/index.html>.)
27. IBERO PUEBLA, & Zambrano Andrade, A. (2017, mayo). Proyecto Integral Urbano (N.º1). Universidad Iberoamericana Puebla. (pp. 43-45).
28. Universidad Iberoamericana Puebla Repositorio Institucional. (2016). Contaminación del río Atoyac. Infografías animadas. <http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>. <https://repositorio.iberopuebla.mx/bitstream/handle/20.500.11777/1585/Contaminacion%F3n+del+r%EDo+Atoyac.+Infograf%EDas+animadas.pdf;jsessionid=587341A4FEE37EA53D01247FBCFAC6FE?sequence=2>
29. González-Pérez, E., Ortega-Escobar, H. M., Yáñez-Morales, M. J., & Rodríguez-Guillen, A. (2019). DIAGNÓSTICO DE INDICADORES DE CALIDAD FÍSICO-QUÍMICA DEL AGUA EN AFLUENTES DEL RÍO ATOYAC. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 10(1).
30. UNAM & PADHPOT. (2015, octubre). Encuesta sobre conocimientos, percepciones, conductas y actitudes hacia el agua, San Martín Texmelucan (N.º1). Red de Agua UNAM. http://www.agua.unam.mx/padhpot/assets/cdh/puebla/InformeEncuestasPersepcionesConductasActitudes_SMTexmelucan1015.pdf
31. Foro Peruano para el Agua—GWP Perú, & Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). ¿QUÉ ES UNA CUENCA HIDROLÓGICA? (PRIMERA EDICIÓN). Sociedad Geográfica de Lima. Coeditor: Foro Peruano para el Agua - GWP Perú. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf (pp. 30-32)
32. González Jácome, A. & (Universidad Iberoamericana, México). (2009, octubre). EL CONTROL DEL AGUA EN LA CUENCA DE LOS RÍOS ATOYAC Y ZAHUAPAN

- POR EL ESTADO MEXICANO POSREVOLUCIONARIO (Anduli · Revista Andaluza de Ciencias Sociales ed., Vol. 1). Capítulo 6 “La cuenca de los ríos Atoyac y Zahuapan” página 8-10
https://www.researchgate.net/publication/28316225_El_Control_del_Agua_en_la_Cuenca_de_los_Rios_Atoyac_y_zahuapan_por_el_Estado_Mexicano_Posrevolucionario/link/568bc7c908ae8445f58db2c1/download
33. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua & SEMARNAT. (2019). INFORME ANUAL 2020.(pp.22,53) http://atl.org.mx/agua/informe_anual_2020.pdf
 34. Soto Montes de Oca, D. G. (2009, agosto). ESTUDIO PARA ESTIMAR LOS BENEFICIOS ECOLÓGICOS DEL PROYECTO INTEGRAL PARA EL SANEAMIENTO DEL ALTO ATOYAC EN EL ESTADO DE PUEBLA. Dra. Gloria Soto Montes de Oca. (pp.15-17) [http://www.ampres.com.mx/assets/estudio_beneficios_atoyac-\(act-06abr10\).pdf](http://www.ampres.com.mx/assets/estudio_beneficios_atoyac-(act-06abr10).pdf)
 35. SINA, Conagua. Ciclo hidrológico. Conagua. Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/temaphp?tema=cicloHidrologico&ver=reporte>. Fecha de consulta: septiembre 29, 2020. (<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>)
 36. CONAGUA, Dirección Local Puebla. (2010). ESTUDIO GEOHIDROLÓGICO DEL ACUÍFERO VALLE DE PUEBLA, ESTADO DE PUEBLA. (SGT-OCB-PUE-10-P-146-RF-LP). <http://igh.com.mx/Pdf/031.pdf>
 37. Foro Peruano para el Agua—GWP Perú, & Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). ¿QUÉ ES UNA CUENCA HIDROLÓGICA? (PRIMERA EDICIÓN). Sociedad Geográfica de Lima. Coeditor: Foro Peruano para el Agua - GWP Perú. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf (pp. 30-32)
 38. Camino, Mariana A.; Bó, María Juliana; Cionchi, José L.; Del Río, Julio L.; López de Armentia, Adriana; De Marco, Silvia G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Revista Universitaria de Geografía, 14-16. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3832/383257036005/383257036005.pdf>
 39. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3586/358649676011/html/index.html> (Chávez-Cortés, M. M. (2016). Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3586/358649676011/html/index.html>.)
 40. Un acercamiento histórico a las condiciones “originales” de funcionamiento del sistema hídrico subterráneo y su respuesta superficial en la microcuenca de la ciudad de Puebla, Recibido: 27 de agosto de 2013. Aceptado en versión final: 31 de enero de 2014. Esther Galicia Hernández, artículo, pp. 46-49.
 41. Asociación Interciencia Caracas, Venezuela. (2009, diciembre). EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA, MICROBIOLÓGICA Y TOXICOLÓGICA DE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL DEL RÍO ATOYAC, MÉXICO (No. 12). Sistema de Información

- Científica Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33913151007.pdf>
42. Asociación Interciencia Caracas, Venezuela. (2009, diciembre). EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA, MICROBIOLÓGICA Y TOXICOLÓGICA DE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL DEL RÍO ATOYAC, MÉXICO (No. 12). Sistema de Información Científica Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33913151007.pdf>
 43. Gobierno del Estado de Puebla. (2017). PROGRAMA INSTITUCIONAL 2017-2018. COMISIÓN ESTATAL DE AGUA Y SANEAMIENTO DEL ESTADO DE PUEBLA. http://planeader.puebla.gob.mx/pdf/SectorialesViejos/institucionales_2017-2018/PI_CEAS.pdf
 44. Gobierno del Estado de Puebla. (2012). LEY DE AGUA DEL ESTADO DE PUEBLA. http://www.agua.unam.mx/padhpot/assets/cdh/puebla/LeydelAguas_Puebla.pdf. pp. 14-16
 45. INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM & RED DEL AGUA UNAM. (2012). Programa de Apoyo al Desarrollo Hidráulico de los Estados de Puebla, Oaxaca y Tlaxcala (No 1). http://www.agua.unam.mx/padhpot/assets/cdh/generales/Reportefinal_formulacion_200812.pdf
 46. Diario Oficial de la Federación, Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región hidrológica número 18 balsas, 2011, artículo único apartado 2.1.1.
 47. Atoyac, un río clínicamente muerto. (2017, julio). Nexos. <https://www.nexos.com.mx/?p=32776>
 48. Gobierno de México & CONAGUA. (2018). Sistema Nacional de Información del Agua | SINA. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos>.
 49. Altieri Ramírez, M. M. J. & BUAP. (2019). “Los impactos de los Procesos Urbano-Territoriales y de Gestión en la Cuenca del Alto Atoyac”. (Pp. 20-25) <http://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/4724/736219T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 50. Asociación Interciencia Caracas, Venezuela. (2009, diciembre). EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA, MICROBIOLÓGICA Y TOXICOLÓGICA DE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL DEL RÍO ATOYAC, MÉXICO (No. 12). Sistema de Información Científica Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33913151007.pdf>
 51. Gobierno del Estado de Puebla. (2017). PROGRAMA INSTITUCIONAL 2017-2018. COMISIÓN ESTATAL DE AGUA Y SANEAMIENTO DEL ESTADO DE PUEBLA. http://planeader.puebla.gob.mx/pdf/SectorialesViejos/institucionales_2017-2018/PI_CEAS.pdf
 52. Autor para correspondencia: Gloria Soto-Montes de Oca, gsoto@correo.cua.uam.mx & Department of Social Sciences, Metropolitan

Código de campo cambiado

- Autonomous University (UAM), Av. Vasco de Quiroga 4871, Cuajimalpa, 05348, México City. México, gsoto@correo.cua.uam.mx. <https://orcid.org/0000-0002-6370-2136>. (2019). Valor de la restauración de ríos cuando se vive cerca y lejos. La Cuenca de Atoyac en Puebla, México Valué of river restoration when living near and far. The Atoyac Basin in Puebla, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 11-16. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-07>
53. Chávez-Cortés, M. M. (2016). Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3586/358649676011/html/index.html>.
 54. Autor para correspondencia: Gloria Soto-Montes de Oca, gsoto@correo.cua.uam.mx & Department of Social Sciences, Metropolitan Autonomous University (UAM), Av. Vasco de Quiroga 4871, Cuajimalpa, 05348, México City. México, gsoto@correo.cua.uam.mx. <https://orcid.org/0000-0002-6370-2136>. (2019). Valor de la restauración de ríos cuando se vive cerca y lejos. La Cuenca de Atoyac en Puebla, México Valué of river restoration when living near and far. The Atoyac Basin in Puebla, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 11-16. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-01-07>
 55. Carlos Alberto Robalino, Rodríguez Ramón Elfego López Zevallos. (2011). "Sistemas de Drenajes y Agua de Riego en la Cuenca Alta, Media y Baja del Río Valdivia" (1.^a ed.) [Libro electrónico]. <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/90475/D-79340.pdf>
 56. Universidad Nacional del Sur Argentina. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. Revista Universitaria de Geografía, pagina 3-pagina 5. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383257036005>
 57. Soto Montes de Oca, D. G. (2009, agosto). ESTUDIO PARA ESTIMAR LOS BENEFICIOS ECOLÓGICOS DEL PROYECTO INTEGRAL PARA EL SANEAMIENTO DEL ALTO ATOYAC EN EL ESTADO DE PUEBLA. Dra. Gloria Soto Montes de Oca. (página 15-17) [http://www.ampres.com.mx/assets/estudio_beneficios_atoyac-\(act-06abr10\).pdf](http://www.ampres.com.mx/assets/estudio_beneficios_atoyac-(act-06abr10).pdf)
 58. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos San lorenzo Chiautzingo, Data México Org. <https://datamexico.org/es/profile/geo/chiautzingo>, consulta 2021, sitio web.
 59. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Huejotzingo, Puebla Clave geoestadística 21074 2009 http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21074.pdf
 60. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala Clave geoestadística 29019 2009 http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29019.pdf

61. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos San Martín Texmelucan, Puebla Clave geoestadística 21132 2009 http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21132.pdf
62. Crop Monitoring, Consulta 2021, earth observing system, <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndvi/>.
63. Sitio web USGS, LANDSAT <https://mappinggis.com/2015/05/como-descargar-imagenes-landsat/>.