







Gestión del agua pluvial mediante sistemas de retención–detención para la zona de Tulancingo Hidalgo

Rainwater management through retention-detention systems for the area of Tulancingo Hidalgo

Ulises Hipólito-Jiménez ^a, Humberto I. Navarro-Gómez ^{b,*}, Jesús E. Cerón-Carballo ^b, Christopher Contreras-López ^c, Javier Flores-Badillo ^c, Jairo A. Lozano-Hernández ^c

^a Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b GI Ingeniería Civil Forense, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^c Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

El estudio se centra en la gestión del agua en Tulancingo de Bravo, Hidalgo, abordando las inundaciones frecuentes causadas por la urbanización y el cambio climático, por lo que el objetivo es desarrollar un sistema integrado de captación y aprovechamiento de las aguas pluviales, donde no solamente se mitigue el impacto de las inundaciones, sino también se mejore la recarga de los acuíferos. Se propusieron soluciones para evitar encharcamientos en la colonia Vicente Guerrero, con énfasis en facilitar la infiltración del agua pluvial en el subsuelo y reducir los daños a los asentamientos humanos. Los resultados mostraron una reducción significativa del riesgo de inundaciones y una mejora en la recarga del acuífero, validando la efectividad del sistema propuesto de Retención-Detención + Pozos de Absorción, debido a que muestra ventajas en cuanto a rapidez de construcción y efectividad al reducir las inundaciones en un 90% y recarga el acuífero en un 50%.

Palabras Clave: Gestión del Agua, Inundaciones, Urbanización, Cambio climático, Infiltración.

Abstract

The study focuses on water management in Tulancingo de Bravo, Hidalgo, taking into account the frequent flooding caused by urbanization and climate change, so the objective is to develop an integrated system for capturing and using rainwater where not only will the impact of flooding be mitigated, but also the recharge of aquifers will be improved. Solutions were proposed to avoid flooding in the Vicente Guerrero neighbourhood, with emphasis on facilitating the infiltrations of rainwater into the subsoil and reducing damage to human settlements. The results showed a significant reduction in the risk of flooding and an improvement in the recharge of the aquifer, validating the effectiveness of the proposed Retention- Detention + Rainwater soakaway, system. It shows advantages in terms of speed of construction and effectiveness in reducing the floods areas by 90% and recharges the aquifer by 50%.

Keywords: Water management, Flooding, Urbanization, Climate change, Infiltration.

1. Introducción

El Estado de Hidalgo, ubicado cerca de la vertiente del Golfo de México, es particularmente susceptible a desastres naturales influenciados por fenómenos meteorológicos del Océano Atlántico y el Golfo de México. Esta vulnerabilidad se acentúa por su variada geografía, que incluye desde la Huasteca

hidalguense hasta las sierras Otomí-Tepetehua y regiones más áridas como el Altiplano (CENAPRED, 2016).

Tulancingo de Bravo es también conocido como el valle de mismo nombre, dada su conformación geográfica como se nota en la Figura 1. Se ubica en la región hidrológica de la Cuenca del Río Pánuco, ubicada al centro-noreste de la República Mexicana. La subregión corresponde al Alto Pánuco del Río Moctezuma, del cual es afluente el río que recibe diferentes

*Autor para la correspondencia: humberto_navarro@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: hi346452@uaeh.edu.mx (Ulises Hipólito Jiménez), humberto_navarro@uaeh.edu.mx, (Humberto Iván Navarro-Gómez), jesus_ceronc@uaeh.edu.mx, (Jesús Emmanuel Cerón Carballo), christophercl@gmail.com, (Christopher Contreras López), javier_flores11060@uaeh.edu.mx, (Javier Flores Badillo).

nombres: Quetzalapa, Amajac, Metztlán y Río Grande de Tulancingo.

Tulancingo de Bravo, enfrenta desafíos únicos relacionados con la gestión del agua. ya que, por una parte, sufre de sobreexplotación acuífera y por la otra, es propicio a frecuentes inundaciones exacerbadas por el crecimiento demográfico y la expansión urbana de los últimos años como se muestran en los datos estadísticos (Herrera, *et al.*, 2019).

La investigación se centra en la Colonia Vicente Guerrero, un sector particularmente afectado por problemas de abastecimiento de agua potable y riesgos de inundaciones como las sucedidas en 1999 o más reciente en junio pasado del presente año (Aguirre, 2024), como sitio de ejemplo de soluciones locales que pueden establecerse y ser replicables. Se propone la implementación de soluciones que mitiguen encharcamientos e inundaciones, pero que también fomenten la recarga del acuífero local.



Figura 1: Localización del municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo
Fuente: Plan municipal de desarrollo 2016-2020 Tulancingo de Bravo.

Este enfoque busca integrar tecnologías sostenibles para ofrecer una solución duradera y eficaz a los retos hídricos de la región, destacando el estudio por su aplicabilidad y relevancia en el contexto de cambio climático y vulnerabilidad hidrológica.

1.1. Justificación

El suministro de agua dulce representa uno de los desafíos más críticos para la sociedad global. Actualmente, alrededor de 2,000 millones de personas enfrentan escasez de agua, impactando negativamente en la seguridad alimentaria y aumentando la desnutrición a nivel mundial (WWAP - UNESCO, 2019). Esta crisis es particularmente severa en zonas urbanas de rápido crecimiento como el municipio de Tulancingo en el Estado de Hidalgo, México, donde se ha dado un crecimiento sobre el valle como se aprecia en la Figura 2, y la sobreexplotación de los acuíferos y la ineficacia en la gestión de aguas pluviales han exacerbado la problemática.



Figura 2: Valle de Tulancingo, vista aérea 28/09/2010.
Fuente: https://www.flickr.com/photos/hotu_matua/5050467981

La inadecuada gestión del ciclo hidrológico ha transformado las precipitaciones en torrentes contaminantes que deterioran la calidad del agua antes de que pueda ser aprovechada de manera efectiva. El cambio climático agudiza esta situación, alterando la distribución y la intensidad de las lluvias, lo que limita la recarga natural de los acuíferos y aumenta la prevalencia de inundaciones en zonas vulnerables (Nuñez, 2024).

En el ámbito local, Tulancingo ha enfrentado desafíos significativos debido a la sobreexplotación acuífera, con casi el 87% de la superficie del acuífero local bajo restricciones severas de extracción (CONAGUA, 2024). El diseño de infraestructuras sostenibles y resilientes es crucial para asegurar el abastecimiento continuo y de calidad de agua potable para su creciente población urbana.

La investigación aborda directamente las necesidades de comunidades afectadas por la escasez y la mala calidad del agua, ofreciendo aportaciones significativas al campo de la gestión hídrica urbana. Se espera que los resultados del estudio puedan ser aplicados en otras regiones con problemáticas similares, contribuyendo así a un modelo de gestión de recursos hídricos más sostenible y replicable a nivel global.

Esta metodología propone una solución adaptativa frente al cambio climático y representa una alternativa viable y económicamente eficiente frente a las técnicas convencionales de gestión del agua.

1.2. Antecedentes

En Tulancingo de Bravo, la gestión del agua ha enfrentado desafíos críticos debido a la sobreexplotación de acuíferos y a las frecuentes inundaciones exacerbadas por infraestructuras hidráulicas inadecuadas. Históricamente, las respuestas a estos problemas han incluido la construcción de infraestructura tradicional que, lamentablemente, no ha logrado resolver los retos de manera eficiente ni sostenible (Herrera, *et al.*, 2019).

A lo largo de los años, eventos significativos como las inundaciones de 1955, 1999 y 2007 han demostrado las consecuencias devastadoras de un manejo inadecuado del agua, afectando gravemente a la población local (Herrera, *et al.*, 2019). Estos eventos han subrayado la necesidad crítica de innovación en la gestión de recursos hídricos.

En los últimos años, a pesar de los esfuerzos del gobierno y la sociedad civil, el municipio ha enfrentado problemas recurrentes con el suministro y la calidad del agua.

Estudios indican que hasta el 50% del agua se pierde en fugas en las tuberías, exacerbando la escasez y el estrés hídrico en la región (Nuñez, 2024). Esta situación se agrava aún más por el estado deteriorado de las redes de distribución, con quejas frecuentes sobre el suministro irregular de agua potable (Valencia Vargas, 2021).

Ante estos retos, se han adoptado varias estrategias para mejorar la gestión del agua, incluyendo la implementación de tecnologías más eficientes y la promoción de una cultura del uso responsable del agua. Sin embargo, la persistencia de problemas subraya la necesidad de enfoques más integradores y sostenibles (Arzate, 2023).

Es así que el presente estudio tiene por objetivo desarrollar un sistema integrado de captación y aprovechamiento de las aguas pluviales que permitan la gestión del agua en Tulancingo, donde no solamente se mitigue el impacto de las inundaciones, sino también se mejore la recarga de los

Mapa del escurrimiento presente en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

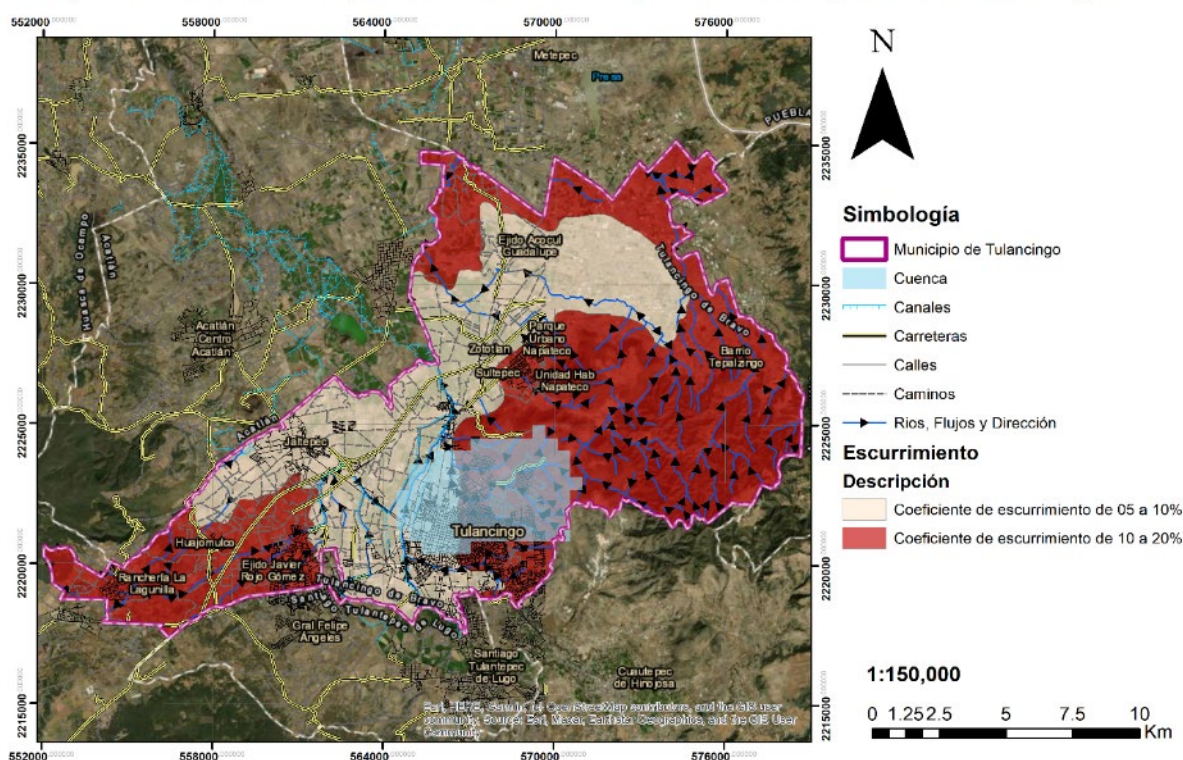


Figura 3: Topografía y Coeficiente de escurrimiento dentro del Municipio de Tulancingo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI.

acuíferos, proporcionando una solución sostenible a largo plazo para el problema de escasez de agua y los desafíos asociados al cambio climático y la expansión urbana.

2. Caso de estudio

Esta sección proporciona el fundamento para entender las dinámicas ambientales y geográficas que influyen en la gestión de recursos hídricos en Tulancingo, Hidalgo. Además, sirve como base para los requerimientos de soluciones innovadoras y sostenibles en el manejo de las aguas pluviales en la región.

2.1. Clima

Tulancingo se caracteriza por un clima semiseco templado que presenta variaciones significativas entre temporadas, lo cual tiene profundas implicaciones para la gestión del agua.

Durante la temporada templada, que se extiende por 2.3 meses desde finales de marzo hasta junio, las temperaturas máximas diarias superan los 24 °C, alcanzando un pico de 25 °C en mayo. En contraste, la temporada fresca dura aproximadamente 4.7 meses, desde septiembre hasta febrero, durante la cual las temperaturas máximas diarias raramente exceden los 21 °C, y las mínimas en enero pueden descender hasta los 6 °C (INEGI, 2010a).

Estas fluctuaciones térmicas afectan directamente los patrones de precipitación y evaporación, influenciando tanto la disponibilidad de agua como las necesidades de su gestión

2.2. Topografía

La zona de Tulancingo se distingue por una topografía dominada por valles y lomeríos suaves, factores que influyen

decisivamente en la distribución y el flujo de las aguas superficiales y subterráneas.

Esta conformación geográfica facilita la acumulación de agua en ciertas áreas, aumentando el riesgo de inundaciones durante episodios de lluvias intensas. Además, la suavidad de los lomeríos permite una expansión urbana que, si no se gestiona adecuadamente, puede alterar significativamente el drenaje natural y la recarga de los acuíferos.

2.3. Hidrografía

El sistema de drenaje en Tulancingo es predominantemente dendrítico, característica que permite una dispersión eficaz del agua de lluvia en áreas no urbanizadas, pero que puede convertirse en un desafío en zonas construidas donde el concreto y el asfalto impiden la infiltración natural. El Río Grande de Tulancingo, como corriente perenne, es el eje principal de la red hidrográfica y desempeña un papel crucial en el manejo de los recursos hídricos de la región.

El Río Grande de Tulancingo, junto con otros arroyos menores, como se observa en la Figura 3, conforman la cuenca hidrográfica Alta del Río Metztlán, un área vital para comprender los desafíos asociados con la gestión de inundaciones y el manejo sostenible de las aguas pluviales en contextos urbanizados (CONAGUA, 2024).

El estudio se desarrolla en la colonia Vicente Guerrero ubicada en la zona central de la ciudad de Tulancingo, Hidalgo, localizada específicamente en la parte noreste.

3. Materiales y métodos

Mapa de edafología principal presente en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

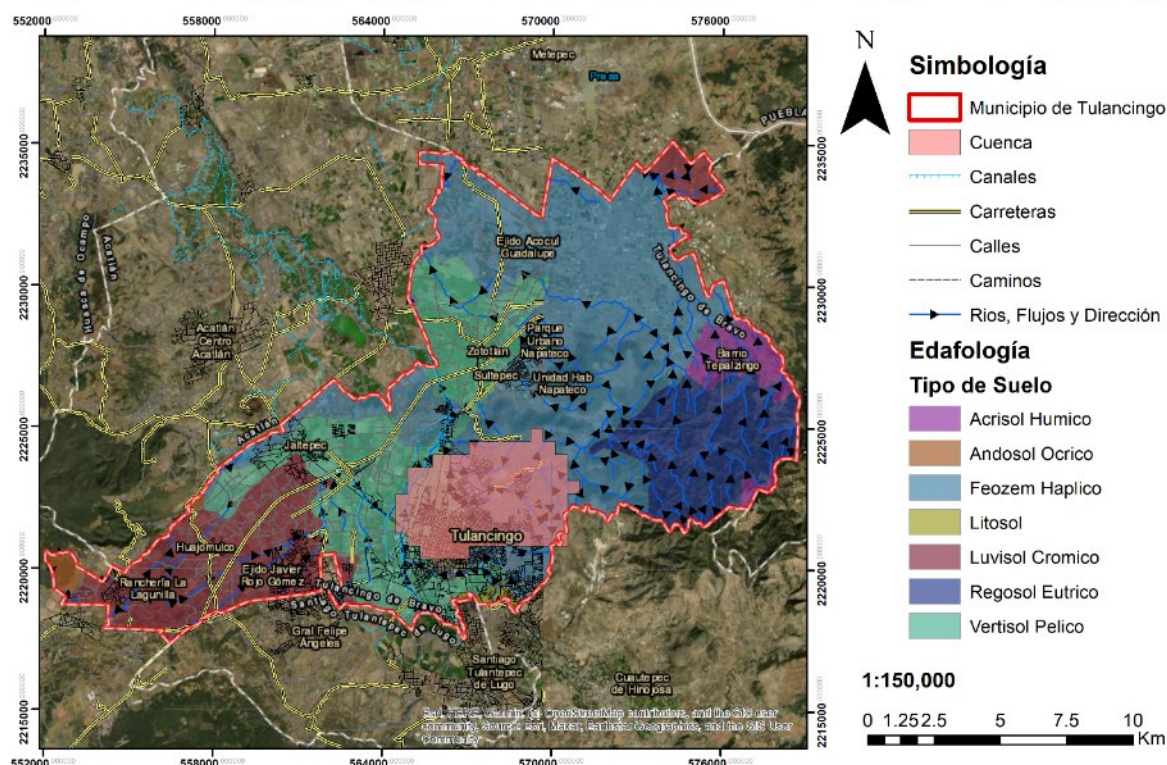


Figura 4: Edafología dentro del Municipio de Tulancingo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONABIO.

El objetivo del estudio, como ya se mencionó, es desarrollar un sistema integrado de captación y aprovechamiento de las aguas pluviales que permitan la gestión del agua en Tulancingo. Es así que, para la comprensión y propuestas de solución a este problema, la metodología parte de la recopilación de datos generales basado en un análisis de criterio múltiple usando los Sistemas de Información Geográfica (Abd-El-Kader, *et al.*, 2023), a partir de una microcuenca a los datos particulares, muestreos específicos para el diseño y comparación de diferentes alternativas de solución. El estudio se desarrolló en un periodo de seis meses en la colonia Vicente Guerrero, utilizando técnicas de análisis topográfico y muestreo de suelos para adaptar el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de agua pluvial.

3.1. Recopilación de datos

La recopilación de datos se realizó mediante un extenso rastreo de bases de datos académicas y gubernamentales como ERIC, INEGI, CICESE, SGM y fuentes internacionales.

Se revisaron documentos históricos y recientes que detallan episodios de inundaciones, manejo de aguas y estrategias de mitigación empleadas anteriormente en la región de Tulancingo (CONAGUA, 2024).

Se incluyeron datos del destino actual de las aguas del arroyo, proyectos anteriores y estudios sobre el cambio climático y su influencia en la región (CONAGUA, 2024).

Además, se obtuvieron datos sobre el impacto del cambio climático en la región para comprender mejor cómo este fenómeno afecta los patrones de precipitación y las consecuencias hidrológicas en la zona estudiada.

3.2. Modelado y simulación

Una vez analizados los datos, se procede al modelado topográfico e hidrológico de la cuenca, para lo cual, se empleó el software GIS y SIATL v4.0 (INEGI, 2010b). Estas herramientas permitieron simular el comportamiento del flujo de agua basado en datos de precipitación histórica y proyectada.

La simulación ayudó a visualizar el recorrido del agua durante los eventos de lluvia y a diseñar la capacidad de los sistemas de retención/detención para manejar adecuadamente estos volúmenes.

3.3. Análisis cartográfico de la edafología y geohidrología

Obtenida la base y el recorrido del agua, se llevó a cabo un análisis detallado del suelo y del subsuelo en la colonia Vicente Guerrero, donde predominan suelos de Phaeozem y Vertisol que se contempla en la Figura 4.

Estos suelos se derivan de materiales volcánicos y presentan características particulares como una alta capacidad de retención de humedad y una estructura que puede complicar la infiltración (Krasilnikov, *et al.*, 2013).

A través de la utilización de técnicas de muestreo directo y pruebas de penetración estándar, se determinó la composición exacta y la permeabilidad de estos suelos.

La permeabilidad, como se muestra en la Figura 5, observada en estos suelos es crucial para diseñar sistemas efectivos de retención y detención de agua pluvial.

Mapa de tipo de aguas subterráneas presente en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo.

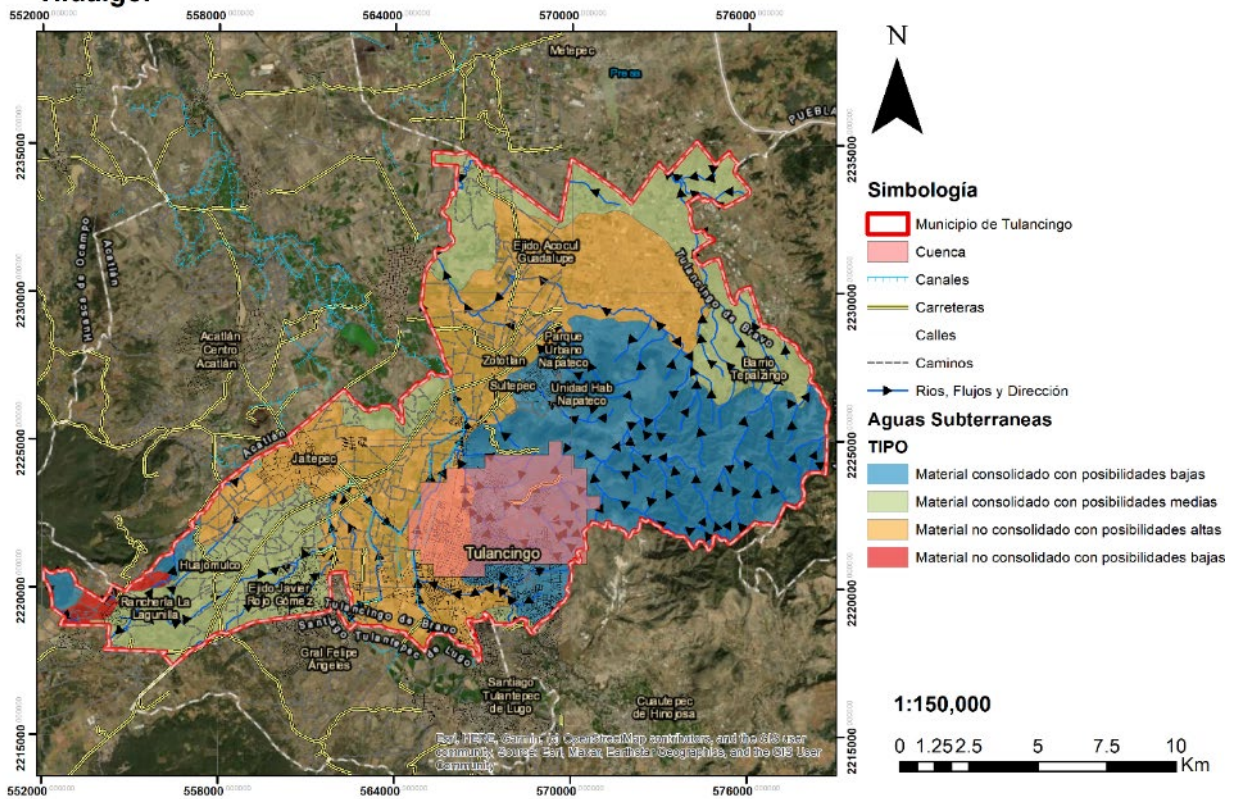


Figura 5: Permeabilidad del suelo, para la recarga del acuífero Tulancingo (1317, dentro del Municipio de Tulancingo). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI.

Mapa de principal geología y litología presente en el municipio de Tulancingo de Bravo, Hidalgo, de acuerdo al SGM

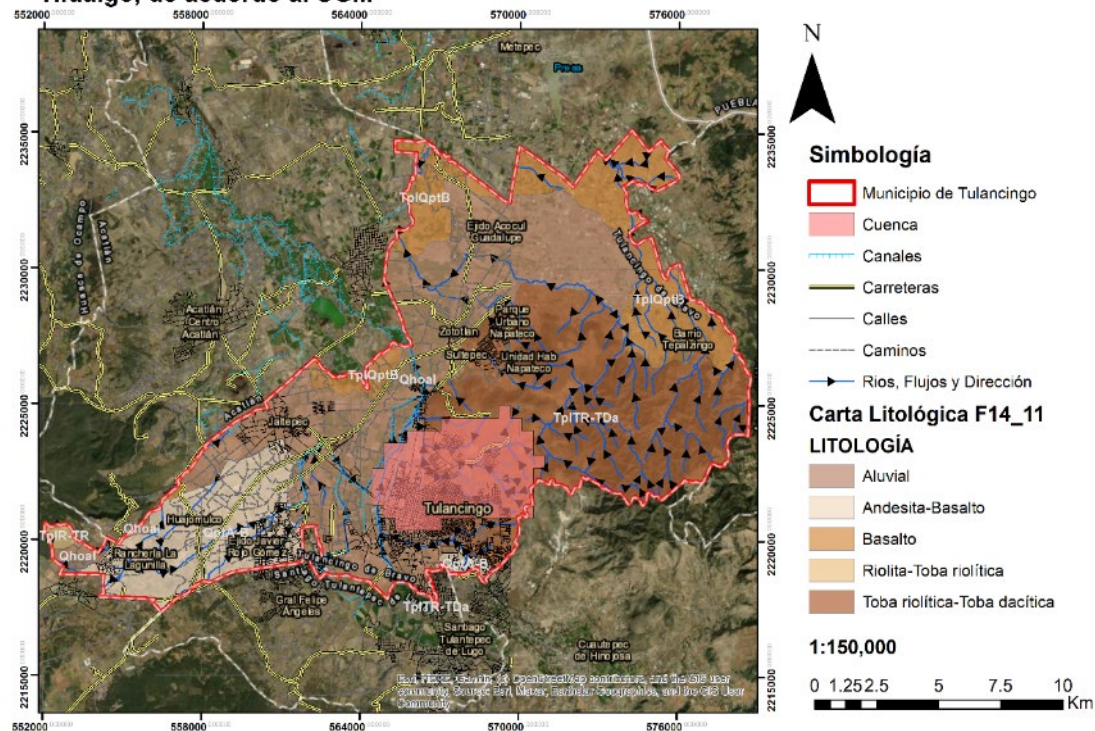


Figura 6: Litología dentro del Municipio de Tulancingo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Servicio Geológico Mexicano.

Adicionalmente, se exploró la geología subsuperficial, Figura 6, encontrando capas de basalto y cenizas volcánicas que sugieren una permeabilidad moderada y potencial para la infiltración dirigida hacia el acuífero local.

3.4. Diseño de ingeniería y selección de ubicación

El diseño del sistema de retención/detención se fundamentó en un riguroso análisis de los parámetros del cauce y la cuenca, comparándolos con los criterios establecidos en la norma hidrológica nacional (CONAGUA, 2009). Se seleccionaron los sitios más adecuados para la ubicación de las obras basándose en análisis topográficos detallados y considerando las características hidrológicas específicas de la cuenca. Los periodos de retorno de 5 y 100 años se utilizaron para calcular los caudales máximos y diseñar un sistema capaz de manejar tanto eventos normales como extremos.

3.5. Muestreo de suelos

Se emplearon métodos de muestreo in situ para la recopilación de datos sobre la calidad del agua, la estructura del suelo y otros parámetros geohidrológicos. Se diseñaron instrumentos específicos para la recolección y análisis de estos datos, garantizando su validez y fiabilidad. Los datos recopilados se procesaron y analizaron utilizando software estadístico (SAS, SPSS), asegurando que la interpretación de los resultados fuera objetiva y basada en evidencia científica.

3.6. Análisis de alternativas

Las alternativas consideradas abarcaron desde sistemas de detención/retención de agua pluvial, infiltración del agua construyendo estructuras para alimentar pozos de absorción por inyección directa, uso de infraestructura de alcantarillado existente y nuevas propuestas de drenajes sostenibles, hasta la incorporación de tratamientos para mejorar la calidad del agua antes de su infiltración o uso adicional de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007 (CONAGUA, 2009).

Fueron analizados 3 lugares en específico para las posibles alternativas. En la Figura 7 se muestran los 3 puntos analizados.

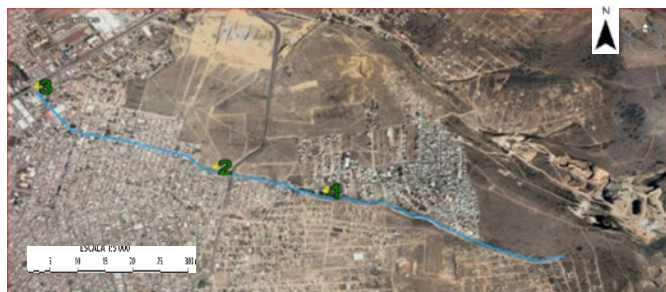


Figura 7: Puntos analizados en campo para el establecimiento más idóneo de las alternativas, (Google Earth, 2023).

3.7. Datos de la cuenca y el cauce

Se presentan a continuación, en las Tablas 1, 2 y 3, los datos de los 3 lugares idóneos para las posibles alternativas de tratamiento, estos datos, entre otros, son los de elevación, pendiente y longitud del cauce, intensidad de lluvia,

coeficientes de escurrimiento y permeabilidad, y los parámetros de la subcuenca de estudio.

Tabla 1. Datos de elevación, pendiente del cauce y parámetros de la subcuenca en estudio tomados en el punto 3.

Datos en el punto 3	
Elevación máxima	2,416 m.s.n.m.
Elevación media	2,210 m.s.n.m.
Elevación mínima	2,151 m.s.n.m.
Pendiente de la cuenca	7.57 %
Longitud del cauce	3,240 m
Pendiente media del cauce:	7.28 %
Tiempo de concentración	27 min.
Área drenada hasta el punto 3	2.690 km ²
Área de la cuenca	3.152 km ²
Intensidad de lluvia Tr 5 años	52.565 mm/h
Intensidad de lluvia Tr 100 años	58.819 mm/h
Coefficiente de escurrimiento	0.70
Coefficiente de permeabilidad	1.63 10 ⁻³ a 7.56 10 ⁻⁴
Q pico Tr 5 años	27.497 m ³ /s
Q Tr100 años	30.768 m ³ /s

Tabla 2. Datos de elevación, pendiente del cauce y parámetros de la subcuenca en estudio tomados en el punto 2.

Datos en el punto 2	
Elevación máxima	2,354 m.s.n.m.
Elevación media	2,242 m.s.n.m.
Elevación mínima	2,174 m.s.n.m.
Pendiente media de la cuenca	9.70 %
Longitud del cauce	1,990 m
Pendiente media del cauce	9.05 %
Tiempo de concentración	18 min.
Área drenada hasta el punto 2	1.67 km ²
Área de la cuenca	1.93 km ²
Intensidad de lluvia Tr 5 años	66.868 mm/h
Intensidad de lluvia Tr 100 años	74.823 mm/h
Coefficiente de escurrimiento	0.70
Coefficiente de permeabilidad	1.63 10 ⁻³ a 7.56 10 ⁻⁴
Q Tr 5 años	21.715 m ³ /s
Q Tr 100 años	24.299 m ³ /s

Las intensidades fueron obtenidas bajo el criterio de predicción de Cheng-Lung Chen para lluvias de duración de 1 hora (60 minutos) y el método de ajuste de Gumbel, ya que es el que presentó un menor valor del error estándar.

El cálculo de gastos pico se realizó utilizando el Método Racional Americano.

El sitio denominado “punto 1” fue desechado por que la cavidad considerada para alojar alguna estructura requiere el desalojo de asentamientos dentro del cauce, la estabilización del terreno y el relleno de parte de la cavidad con material de tal manera que se pueda cumplir con las recomendaciones emitidas por CONAGUA en su normatividad.

Considerando lo anterior se decidió por el punto 2 como base para las alternativas a desarrollar.

Tabla 3. Datos de elevación, pendiente del cauce y parámetros de la subcuenca en estudio tomados en el punto 1.

Datos en el punto 1	
Elevación máxima	2,416 m.s.n.m.
Elevación media	2,267 m.s.n.m.
Elevación mínima	2,209 m.s.n.m.
Pendiente media de la cuenca	13.01 %
Longitud del cauce	1,340 m
Pendiente media del cauce	10.82 %
Tiempo de concentración	12 min.
Área drenada hasta el punto 1	0.76 km ²
Área de la cuenca	0.88 km ²
Intensidad de lluvia Tr 5 años	82.114 mm/h
Intensidad de lluvia Tr 100 años	91.884 mm/h
Coefficiente de escurrimiento	0.70
Coefficiente de permeabilidad	1.63 10 ⁻³ a 7.56 10 ⁻⁴
Q Tr 5 años	12.136 m ³ /s
Q Tr 100 años	13.579 m ³ /s

Las alternativas analizadas para un Tr de 5 años fueron:

- Sin acciones, es decir dejar las condiciones actuales.
- Utilizar un Sistema de retención-detención + el uso de pozos de absorción
- Utilizar un Sistema de retención-detención + el uso de pozos de infiltración directa.
- Utilizar un Sistema de retención-detención + el uso de SUDS.
- Utilizar solo SUDS (sistema urbano de drenaje sostenible)

Las consideraciones generales en el análisis de cada alternativa fueron:

- Q de diseño 21.715 m³/s para Tr de 5 años (66.810 mm/h)
- Coeficiente de escurrimiento (Ce): 0.70
- Coeficiente de permeabilidad (k): 1.63 x 10⁻³ m/s
- Tiempo de retención del tanque de tormenta: 30 minutos en las alternativas con sistema de retención.
- Características del arroyo: ancho de 3-4 metros, altura de 3 metros, taludes 1.5 a 1, n de Manning con hierba o limpio.
- Caudal permitido en el arroyo por hasta 24 horas.
- Duración de la lluvia: 1 hora, sin interferencia con lluvias importantes en el 90% de los casos en las 24 horas subsiguientes.
- En todos los casos el diseño y las características del agua infiltrada cumplen con la NOM-015-CONAGUA-2007 para infiltración de agua (CONAGUA, 2009).

Para evaluar las distintas alternativas, en la tabla 4 se han considerado diversos factores como la reducción de inundaciones, la recarga del acuífero, el costo inicial, el mantenimiento, y el impacto en la infraestructura urbana.

4. Resultados y discusión

Se obtuvieron los resultados de las diferentes alternativas para la reducción de inundación y recarga de los acuíferos que se muestran a continuación:

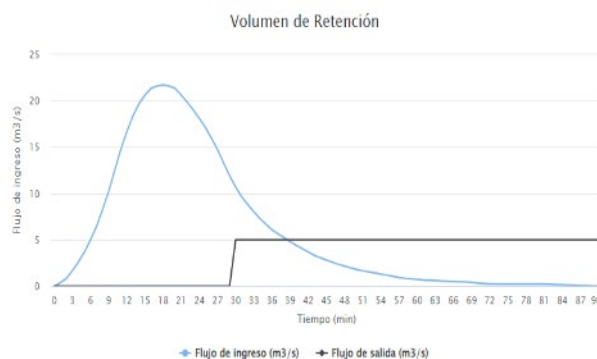


Figura 8: Comportamiento de Qe y Qs en tanque de tormenta.

4.1. Sin acciones (S/A)

- Volumen de Retención (m³): 0
- Reducción de Inundaciones: 0%
- Recarga del Acuífero: 0%
- Costo Inicial: N/A
- Mantenimiento: N/A
- Impacto en la Infraestructura Urbana: Alto (inundaciones)
- No realizar ninguna acción resultará en inundaciones continuas y ninguna mejora en la recarga del acuífero. Esta opción no es viable para la comunidad.

4.2. Sistema de retención-detención + pozo de absorción (S1)

- Volumen de Retención (m³): 25.23
- Reducción de Inundaciones: 90%
- Recarga del Acuífero: Alta (50%)
- Costo Inicial: Medio
- Mantenimiento: Medio
- Impacto en la Infraestructura Urbana: Bajo
- Esta combinación es muy efectiva para reducir inundaciones y recargar el acuífero. Tiene un costo y mantenimiento manejable, y un impacto mínimo en la infraestructura urbana.

4.3. Sistema de retención-detención + pozo de infiltración (S2)

- Volumen de Retención (m³): 25.23
- Reducción de Inundaciones: 90%
- Recarga del Acuífero: Alta (50%)
- Costo Inicial: Alto
- Mantenimiento: Alto
- Impacto en la Infraestructura Urbana: Medio
- Similar a la alternativa anterior, pero con un costo inicial y mantenimiento más altos debido a la necesidad de infraestructura adicional para la inyección directa.

4.4. Sistema de retención-detención + SUDS (S3)

- Volumen de Retención (m³): 25.23
- Reducción de Inundaciones: 70%
- Recarga del Acuífero: Medio (30%)
- Costo Inicial: Alto
- Mantenimiento: Medio

- Impacto en la Infraestructura Urbana: Medio tienen un volumen de 25.23 m³, a excepción de la

Tabla 4. Comparativa de Alternativas.

Criterio	Sin acciones (S/A)	Sistema de retención – detención + pozos de absorción (S1)	Sistema de retención + pozos de infiltración directa (S2)	Sistema de retención + detención SUDS (S2)	Solo SUDS (S3)
Volumen de retención (m ³)	0	25.23	25.23	25.23	25.23
Reducción de inundaciones	0%	90%	90%	70%	50%
Recarga del acuífero	0%	Alta (50%)	Alta (50%)	Media (30%)	Media (30%)
Costo inicial	N/A	Medio	Alto	Alto	Medio
Mantenimiento	N/A	Medio	Alto	Medio	Medio
Impacto en la infraestructura urbana	Alto (inundaciones)	Bajo	Medio	Medio	Medio

- Impacto en la Infraestructura Urbana: Medio
- Esta alternativa ofrece una reducción significativa en las inundaciones y una recarga del acuífero moderada, pero tiene un costo inicial alto.

opción donde no hay acciones que presenta un volumen nulo.

- Efectividad en la Reducción de Inundaciones: El Sistema de retención – detención + pozos de absorción ofrece la mayor reducción de inundaciones (90%), en comparación con los otros sistemas, en específico el que solamente utiliza los SUDS con un 50% y retención + detención SUDS con un 70%, mientras que el sistema de retención + pozos de infiltración directa presenta la misma efectividad del 90% como se aprecia en la Figura 10.

4.5. Solamente SUDS (S4)

- Volumen de Retención (m³): 25.23
- Reducción de Inundaciones: 50%
- Recarga del Acuífero: Media (30%)
- Costo Inicial: Medio
- Mantenimiento: Medio
- Impacto en la Infraestructura Urbana: Medio
- Implementar solo SUDS ofrece una reducción moderada de inundaciones y recarga del acuífero, pero no es tan efectivo como las combinaciones con sistemas de retención-detención.

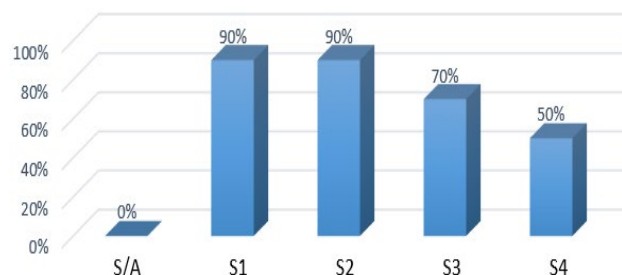


Figura 10: grafica de reducción de inundaciones

4.6. Mejor alternativa

Se realizó un análisis comparativo que se presenta en la tabla 4, donde se compararon los diferentes sistemas analizados y se obtuvo la mejor alternativa, que es el Sistema de Retención-Detención + Pozos de Absorción ya que cumple con el objetivo del estudio y tiene ventajas en cuanto a rapidez de construcción y efectividad sobre las otras alternativas, resultados que se describen a continuación.

Recarga de acuíferos

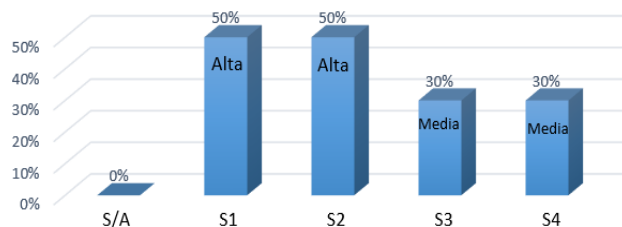


Figura 11: Grafica de Recarga de acuíferos.

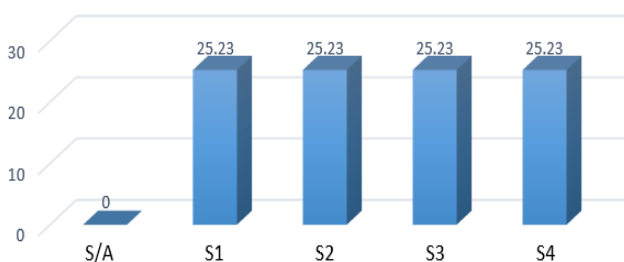


Figura 9: Grafica de volúmenes de retención.

- En cuanto al volumen de retención, como se parecía en la Figura 9, no se presenta ninguna diferencia entre los diferentes sistemas analizados, ya que todos

- Infiltración al subsuelo: En cuanto a la recarga del acuífero, se tiene una alta capacidad de recarga (50%) para los sistemas de retención – detención + pozos de absorción y retención + pozos de absorción, mientras que para los sistemas restantes se tiene una capacidad de recarga media (30%) y sin acciones en un 0%, tal y como se nota en la Figura 11

- Costo y Mantenimiento: Se observa que el sistema de retención – detención + pozos de absorción, tiene un costo inicial y mantenimiento manejables en comparación con las otras alternativas, que, además no es equiparable ya que este sistema tiene una alta efectividad tal y como lo muestran los resultados de las figuras 12 y 13.



Figura 12: Costo inicial.

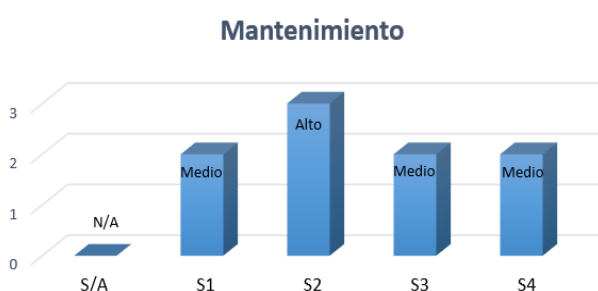


Figura 13: Mantenimiento.

- Impacto en la Infraestructura Urbana: Se observa en la Figura 14 que el sistema de retención – detención + pozos de absorción, tiene un impacto mínimo en la infraestructura urbana existente, lo que facilita su implementación y operación a largo plazo, en comparación con los otros sistemas que tienen un impacto medio y sin acciones que tiene un impacto alto. Esta alternativa combina la efectividad en la gestión de aguas pluviales con la sostenibilidad y factibilidad económica, proporcionando beneficios significativos tanto a corto como a largo plazo para la comunidad.

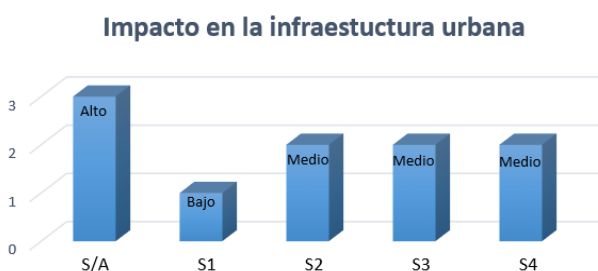


Figura 14: Impacto en la infraestructura urbana.

este, incluso para su conexión con el colector construido por la Comisión de Agua y Alcantarillado del Municipio de Tulancingo.

5. Conclusiones

Es crucial que los resultados de este estudio se consideren no solo como una solución técnica, sino como una oportunidad para integrar políticas públicas que promuevan activamente las soluciones basadas en la naturaleza. Estas políticas pueden facilitar la implementación y expansión de sistemas de retención y detención de agua pluvial, asegurando que se alineen con las metas de sostenibilidad a largo plazo y con la protección de los recursos hídricos en regiones urbanas vulnerables como Tulancingo.

El enfoque adoptado en este estudio no solamente demuestra su eficacia a nivel técnico, sino que también resalta la necesidad de desarrollar e implementar políticas públicas que apoyen las soluciones basadas en la naturaleza. Estas políticas son fundamentales para asegurar que los sistemas propuestos puedan ser replicados y adaptados en otras regiones con desafíos similares, promoviendo una gestión sostenible del agua que responda a los retos del cambio climático.

5.1. Validación de la hipótesis

Los resultados confirmaron que un enfoque integrado de gestión de aguas pluviales puede mejorar significativamente la gestión del agua en zonas urbanas vulnerables como Tulancingo.

5.2. Comparación con estudios previos

Se observó que las soluciones basadas en la retención y la infiltración controlada son efectivas, alineándose con lo encontrado en la literatura. La novedad, en este caso, es que una evaluación de diversos factores, normalmente no se consideran al dar una solución y también se busca remarcar la importancia de basarnos en el respeto al medio ambiente y la protección a la población vulnerable.

5.3. Implicaciones futuras del estudio

La adaptabilidad y eficiencia del sistema propuesto pueden ser replicadas o modificadas según las necesidades específicas de otras áreas urbanas y suburbanas.

Se recomienda que las políticas públicas a nivel local y nacional incorporen soluciones basadas en la naturaleza como una estrategia clave para la gestión del agua. Esto incluye la promoción de técnicas de bioingeniería y la implementación de sistemas de retención y detención de agua que no solo mitiguen los riesgos de inundación, sino que también contribuyan a la recarga de acuíferos y la protección del medio ambiente.

De igual forma, se recomienda tomar en cuenta la variabilidad climática y realizar estudios a largo plazo para observar los efectos acumulativos de las soluciones propuestas.

6. Referencias

Abd-El-Kader, M. M., El-Feky, A. M., Saber, M., AlHarbi, M. M., Alataway, A., & Alfaisal, F. M. (2023). Designating Appropriate Areas for Flood Mitigation and Rainwater Harvesting in Arid Region Using a GIS-based

El sistema de drenaje urbano sostenible considerado requiere la preparación del cauce, su limpieza y acondicionamiento periódico para realizar su función, pero no se ocuparán terrenos adicionales al del cauce y derivaciones de

- Multi-Criteria Decision Analysis. *Water Resources Management*, 37, 1083-1108. doi:<https://doi.org/10.1007/s11269-022-03416-6>
- Aguirre, J. M. (2024). Inundaciones en calles, desbordamiento de un dren, todo un caos por lluvia. RUTA Decano de la prensa en el Estado de Hidalgo, pág. en línea.
- Arzate, V. (2023). Criterio. Recuperado el 2024, de <https://criteriohidalgo.com/noticias/regiones/solicitan-resolver-abasto-agua-sector-rojo-gomez-tulancingo>
- CENAPRED. (2016). Atlas Nacional de Riesgos. Recuperado el 2024, de Atlas Estatales Hidalgo: http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/AtlasEstatales/?NOM_ENT=Hidalgo&CVE_ENT=13
- CONAGUA. (2009). NORMA Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración de agua a los acuíferos. -Características y especificaciones de las obras y del agua. *Diario Oficial de la Federación*, págs. 6-13.
- CONAGUA. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tulancingo (1317) Estado de Hidalgo. México: CONAGUA.
- Herrera, E., Magaña, V., & Morett, S. (2019). Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo Hidalgo. *Nova Scientia*, 10(21), 191-206. doi:10.21640/ns.v10i21.1527
- INEGI. (2010a). Compendio de información geográfica municipal 2010 Tulancingo de Bravo. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2010b). SIATL Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. Recuperado el febrero de 2024, de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Krasilnikov, P., Gutiérrez Castorena, M. C., Ahrens, R. J., Cruz Gaistardo, C. O., & Solleiro Rebolledo, E. (2013). Major Soil Types and Their Classification. En A. E. Hartemink (Ed.), *The Soils of Mexico* (págs. 33-74). Zúiza: Springer, Dordrecht. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-007-5660-1_4
- Núñez, C. (2024). La contaminación del agua constituye una crisis mundial creciente. Esto es lo que hay que saber. Recuperado el 2024, de National Geographic: Medio ambiente: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/contaminacion-del-agua>
- Valencia Vargas, G. (2021). Escasez de agua. Recuperado el 2024, de <https://www.noticiastulancingo.com/escasez-de-agua/>
- WWAP - UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París: UNESCO.