Análisis del cambio de la cobertura terrestre y su incidencia en la calidad de agua del Río de Los Perros, Oaxaca; para contribuir en acciones que permitan la restauración hidrológica ambiental

CONACYT

CentroGeo
19°17'30"N 99°13'17"O 2489m

Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial

Especialidad en Geomática

Asesor: Dr. Omar Tapia Silva

José García Hernández

Nallely Isela Trujillo Escamilla

Guadalupe Dolores Espinosa Román

CDMX, agosto 2020

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 5

JUSTIFICACIÓN 8

Objetivo general 9

Objetivos particulares 9

Alcances 10

MARCO TEÓRICO 11

Modelo conceptual. Flujo de trabajo 11

Modelo de conocimiento 12

Modelo geográfico 13

Modelo computacional 14

SOLUCIÓN COLABORATIVA 15

Antecedentes metodológicos 15

METODOLOGÍA 16

RESULTADOS 18

Clasificación del tipo de cobertura terrestre 18

Conectividad hidrológica 19

Calidad de agua 23

Relaciones entre cobertura terrestre y calidad del agua 24

Análisis de la calidad del agua en el río Los Perros 25

Incidencia de la cobertura terrestre y calidad de agua del río los perros 27

CONCLUSIONES 38

BIBLIOGRAFÍA 39

ANEXOS 41

1.Patrones de precipitación 41

2. Parámetros básicos de calidad de agua en las áreas de captación del río de los perros. 42

3. Metales y cianuros en las áreas de captación del río de los perros. 43

4. Resultados de clasificación de imágenes satelitales por áreas de captación acumuladas 44

4. Resultados de clasificación de imágenes satelitales por área de captación 45

5. Porcentajes de cobertura terrestre por área de captación acumulada del periodo 2014-2019 49

INTRODUCCIÓN

“Las cuencas hidrográficas son divisiones naturales del paisaje, el agua drena a través de corrientes superficiales a un punto común pudiendo desembocar en el mar, en un cuerpo de agua interior o infiltrarse antes de encontrar algún cuerpo o superficie colector” (Cotler et al. 2007, Maass y Cotler 2007) de esta manera, se consideran como unidades territoriales idóneas para la planeación y gestión de los recursos naturales. Acorde a Cotler et al.(2010) dentro de una cuenca, la calidad de agua es un buen indicador del impacto de las actividades humanas en un determinado territorio.

Desde el enfoque de cuenca, los usos de suelo antropológicos alteran en mayor medida el ciclo hidrológico natural de las cuencas. Cualquier alteración que el agua presente es relevante, ya que remite a la contaminación de este elemento y en consecuencia, al desequilibrio de los ecosistemas fluviales, la seguridad de la salud pública, la sostenibilidad socioeconómica e incluso en la degradación visual del entorno (Liu et al. 2012)

Guo et al. (2016) y Quiang et al. (2016) sostienen que los usos o cobertura del suelo tienen influencia en la calidad del agua, al ser portadores de actividades humanas en las cuencas hidrográficas. Las fuentes de contaminación o alteración negativa en una cuenca, puede ser de carácter puntual, como las zonas urbanas, o difusas como la agricultura, ganadería entre otros.

Para el caso mexicano, las cuencas hidrográficas son delimitaciones territoriales y estratégicas en relación al agua, que forman parte del Programa Hídrico Nacional; actualmente existen 1471 cuencas que en su interior forman ecosistemas de gran relevancia en la promoción y preservación del equilibrio ecológico de las zonas en las que su ubican. No obstante, la información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), advierte que la mayoría de las cuencas del país, aunque en diferentes proporciones están contaminadas.

En 2013, Torres-Beristáin adjudicó esta contaminación a la inexistencia de una gestión real de las cuencas mexicanas, es decir; existe un desconocimiento por parte de los gobiernos municipales de a qué cuencas, subcuencas y microcuencas pertenecen sus municipios y la gestión del territorio; ya que en México se cuenta con otras delimitaciones territoriales en esta temática, como las 37 regiones hidrológicas, 25 Consejos de Cuenca, 13 Regiones hidrológico administrativas, y 653 acuíferos, los cuales se cortan, entrecruzan y superponen con las jurisdicciones políticas administrativas (Vera 2005).

Problemática

Oaxaca se encuentra dentro de los estados de la República Mexicana que cuentan con regiones hidrológicas prioritarias debido a la diversidad de especies y recursos naturales (CONABIO, 2002). Las aguas superficiales del estado están distribuidas en ocho regiones hidrológicas: RH18 Balsas, RH20 Costa Chica-Río Verde, RH21 Costa de Oaxaca, RH22 Tehuantepec, RH23 Costa de Chiapas, RH28 Papaloapan, RH29 Coatzacoalcos y RH30 Grijalva-Usumacinta (SIATL, 2015). La región hidrológica de Tehuantepec alcanza el 17.87% de la superficie estatal y las cuencas que la conforman son: Laguna Superior e Inferior y Río Tehuantepec.

La subcuenca del Río Los Perros, pertenece a la RH22 dentro de la cuenca laguna superior e inferior, abarca una superficie total aproximada de 1 mil 220.07 km2 y sus aguas drenan directamente a la Laguna Superior, éste afluente atraviesa las cabeceras municipales de Ixtepec, Ixtaltepec, El espinal, Juchitán y Santa Maria Xadani (SIATL/INEGI, 2015) y es considerada como una área de atención prioritaria debido al deterioro de su dinámica funcional y nivel de presión esperado (Cotler et al. 2010).

De acuerdo con el Instrumento de Gestión Integrada de la Cuenca del Río Los Perros (2016) se consideran como problemas principales: la falta de cultura ambiental del agua, desconocimiento y escasa aplicación del marco jurídico en materia ambiental. Destaca también el uso ineficiente del agua, contaminación del medio natural, disminución de la capacidad de los ecosistemas para seguir

brindando servicios ecosistémicos, así como el crecimiento territorial desordenado y el aumento demográfico; ya que cerca del 78.7% de la población se encuentra 2 localidades urbanas de la cuenca baja: Juchitán de Zaragoza y Ciudad Ixtepec (INEGI, 2010). Además, las plantas tratadoras de aguas residuales actualmente no se encuentran en operación con excepción de la localizada en el municipio de Juchitán.

Este proyecto se desarrolla en torno a la influencia de los tipos de cobertura terrestre en el problema de contaminación del agua del río, ya que el comité de la cuenca estima que aproximadamente 600 litros por segundo de aguas negras son vertidas a ese río; lo que repercute también en la pérdida de biodiversidad como la desaparición de la nutria (Lontra provocax) especie considerada en peligro por la IUCN y bioindicadora de la calidad del agua, la muerte de peces que lleva afectaciones pesqueras, además de riesgos a la salud, principalmente para los habitantes que viven en las riberas.

Región de estudio

La cuenca del río Los Perros pertenece a la Región Hidrológica número 22 (RH 22 Tehuantepec), es una subcuenca de la “Cuenca Laguna Superior e Inferior” de 1,220 kilómetros cuadrados aproximadamente (SIATL/INEGI, 2015). Se presenta la concurrencia de 14 municipios de los cuales 2 concurren totalmente (Santiago Laollaga y Santo Domingo Chihuitán) y 2 mayoritariamente (Santa María Guienagati y Ciudad Ixtepec) con sus actividades económicas y productivas, distribuidas en 8 localidades urbanas y 103 rurales.

Figura 1. Delimitación de la cuenca río de los perros

Fuente: elaboración propia

Esta zona se determinó considerando el muy alto nivel de alteración dinámica funcional que presentaba la cuenca (Cotler *et al*., 2010) derivado de factores como el cambio de la cobertura vegetal y el incremento de la población.

JUSTIFICACIÓN

La cuenca Río Los Perros concentra atención debido al alto grado de alteración de la dinámica funcional (en la que se incluyen el índice de Transformación Humana de los Ecosistemas, degradación de suelos, fragmentación de ríos, deterioro de zonas riparias, presión hídrica y contaminación potencial difusa) que reporta Cotler y colaboradores (2009). Sin embargo, no existen estimativos o catastros locales consolidados que informen sobre las áreas terrestres que contribuyen en mayor medida con la contaminación presente en el agua del río principal, Río Los Perros.

El Comité de Cuenca Río Los Perros ha elaborado un Instrumento de Gestión en el que se han identificado los problemas que enfrenta la cuenca y se plantean

soluciones a través del desarrollo de objetivos operativos, estrategias y acciones con un ámbito a nivel de microcuencas. Dentro de estos objetivos operativos se encuentra el objetivo número 4: “Disminuir el grado de contaminación de los cuerpos de agua en el territorio de la cuenca” que concreta acciones tales como la identificación de las principales fuentes de contaminación.

Derivado de lo anterior, surge la necesidad de contar con métodos que permitan explorar la relación entre las variaciones del tipo de cobertura terrestre y los parámetros de calidad de agua en ríos y cuerpos de agua a una escala geográfica de análisis adecuada para analizar y sintetizar la información disponible dada la complejidad y heterogeneidad de las cuencas (Steinfeld et al., 2006).

Los resultados de este proyecto pueden contribuir en la identificación espacial de las principales fuentes de contaminación tanto puntuales como difusas, asociadas al tipo de cobertura terrestre por área de captación dentro de la cuenca que ingresan al Río Los Perros, aportando información que permita identificar áreas vulnerables de contaminación y contribuya en la definición de zonas prioritarias de atención dentro de los límites de la cuenca. lo anterior, permitirá elaborar recomendaciones que ayuden a combatir la contaminación en su origen y la restauración hidrológica ambiental.

Objetivo general

Analizar los tipos de cobertura terrestre y su impacto en la calidad de agua de las áreas de captación del río Los Perros, Oaxaca; que contribuya a generar acciones factibles para la restauración hidrológica ambiental, 2014-2019.

Objetivos particulares

- Analizar los tipos de cobertura de suelo de la CRLP, Oaxaca.
- Realizar el estudio hidrológico: conectividad hidrológica superficial, dirección de flujos para determinar áreas de captación dentro de los límites de la cuenca.

- Analizar la calidad del agua de acuerdo con los indicadores establecidos en la NOM-001- SEMARNAT-1996 y los operados por la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua de CONAGUA.
- Determinar y explicar la incidencia de la cobertura terrestre en la calidad del agua por áreas de captación.
- Generar recomendaciones que coadyuven a la restauración hidrológica ambiental en la Cuenca del Río Los Perros.

Alcances

Análisis exploratorio cualitativo-visual del efecto del tipo de cobertura terrestre en la calidad del agua de las áreas de captación en la subcuenca del río Los Perros, Oaxaca, México.

Mapa relacional entre el tipo cobertura terrestre y parámetros de calidad de agua por área de captación en la cuenca Río Los Perros, 2014-2019.

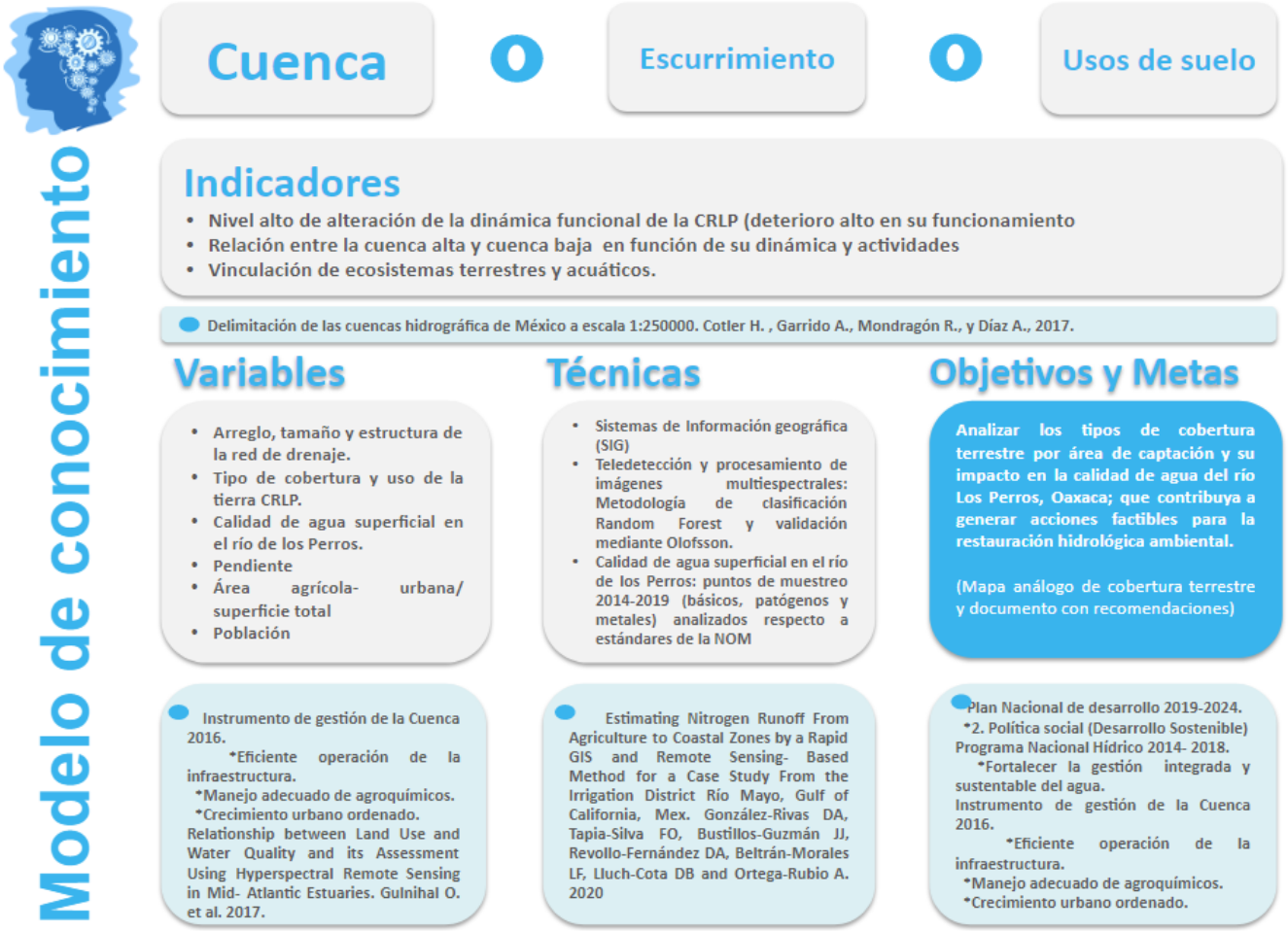
Propuestas de restauración hidrológica ambiental considerando los resultados obtenidos del análisis de contaminantes por área de captación y sus principales tipos de cobertura terrestre.

MARCO TEÓRICO

Modelo conceptual. Flujo de trabajo

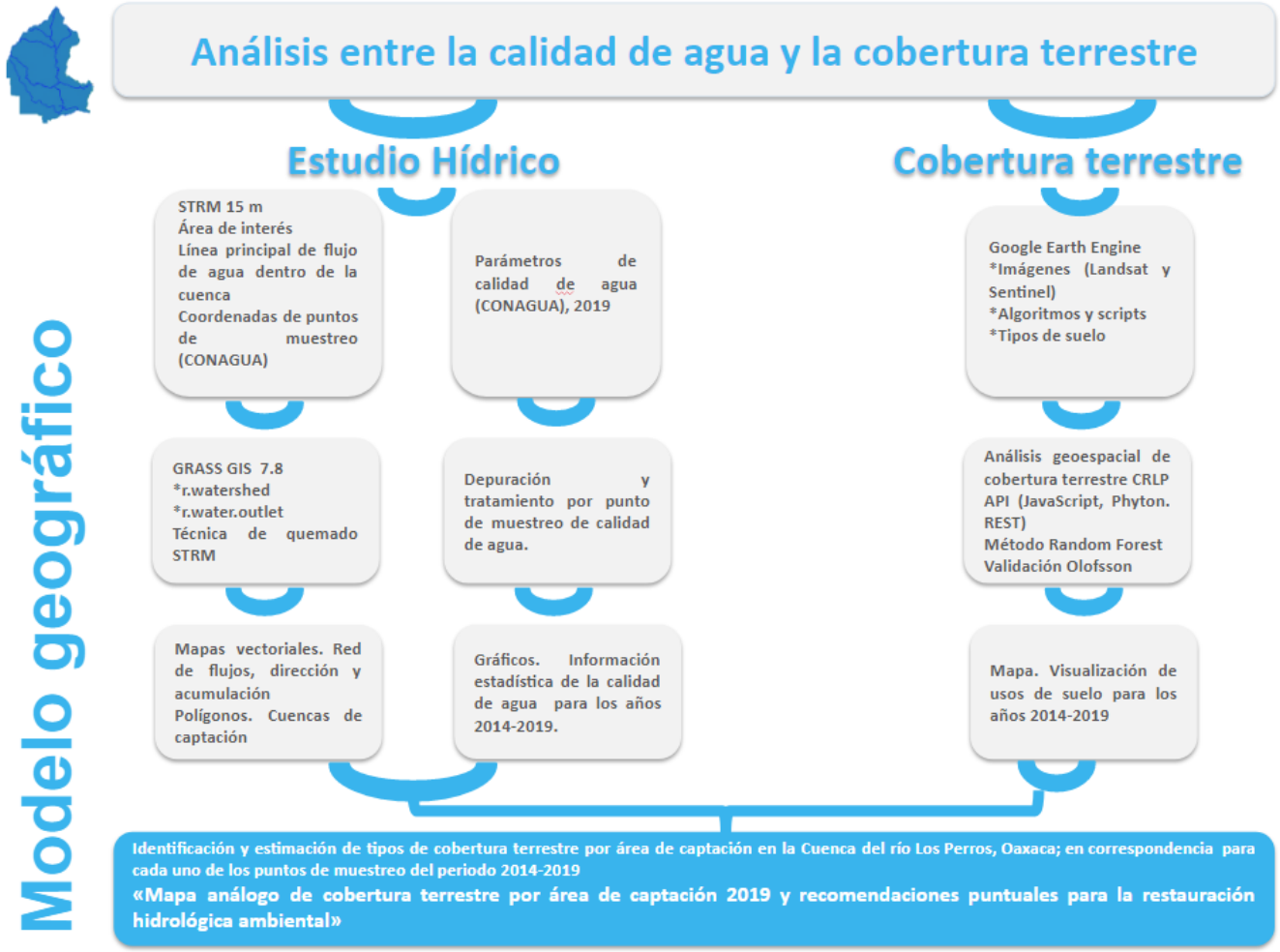
Fuente: elaboración propia

Modelo de conocimiento



Fuente: elaboración propia

Modelo geográfico



Fuente: elaboración propia

Modelo computacional

Fuente: elaboración propia

SOLUCIÓN COLABORATIVA

Antecedentes metodológicos

Estudios de caso consultados

Los SIG y la percepción remota han ayudado a evidenciar la relación entre el tipo de cobertura terrestre y la calidad de agua, i) en los ríos Bortala, Jinghe, Aqikesu y Kuitun Asia Central, Wang y Zhang (2018) relacionan el uso de suelo con los picos de fluorescencia tridimensional espectral, lo cual se explica mejor con centroides a 200 m, determinan que las áreas de cultivo influyen en el nitrógeno y las áreas de bosques estaban negativamente relacionadas con las cargas de nitrógeno y fósforo (Kiedrzyńska, et al. 2014), ii) en los estuarios del Atlántico Medio Ozbay et al. (2017) utilizan buffers en imágenes hiperespectrales AISA aerotransportadas en el estuario Blackbird Creek para analizar suspensión de residuos sólidos, turbidez y clorofila, iii) cuenca del río Juqueri Brasil utilizan correlaciones canónicas durante el periodo de 1986-2016, encuentran que las áreas urbanas y agrícolas influyen en la disminución de la DBO y el oxígeno disuelto; y en el incremento de la turbidez, sólidos to-tales, nitrógeno y fósforo (Pérez-Ortega et al., 2017).

Estudios en México, i) cuenca del río Seco Veracruz para localizar fuentes puntuales y no puntuales de contaminación y encuentran que los asentamientos humanos urbanos es la fuente puntual de cargas orgánicas y de nitrógeno (Torres-Beristáin et al., (2013), ii) cuenca del río Conchos, Chihuahua utilizan el coeficiente de correlación de Pearson entre los ND de una imagen Landsat TM5 y los parámetros de calidad de agua, y encuentran que el crecimiento urbano, la industrialización y la agricultura han degradado de manera notable los recursos hídricos (Amado-Álvarez et al., 2019), iii) lago de Chapala examinan la distribución geoespacial de las concentraciones de contaminantes en el agua del lago de Chapala utilizando imágenes Landsat 7 y 8 (Noyola-Medrano et al. 2019), v) distrito de riego río Mayo utilizan imágenes Landsat, MODIS y el KD490 para estimar la cantidad de nitrógeno

de las parcelas agrícolas que ingresan al Golfo de California Sonora (González-Rivas et al., 2020).

La relevancia de este proyecto se centra en los aportes metodológicos de Tapia-Silva et al., (2017) y González-Rivas et al., (2020) quienes proponen desde la geomática un método útil y rápido basado en SIG y PR para estimar la relación entre el tipo de cobertura terrestre y los parámetros de calidad de agua por áreas de captación de la cuenca.

En México, un estudio recientemente publicado resultado de la colaboración de investigadores del Centro de Investigación Biológica del Noreste (CIBNOR), La Paz (México), Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa (México) y el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Ciudad de México (México)1 pone de manifiesto la importancia de contar con un método rápido para estimar la cantidad de nutrientes que entran en los ecosistemas marinos producto de la escorrentía agrícola y zonas urbanas sin contar con datos de campo.

METODOLOGÍA

La metodología empleada aplicada consta de tres procesos generales: i) clasificación del tipo de cubierta terrestre ii) caracterización hidrológica para determinar las áreas de captación, iii) calidad del agua y iv) relación cualitativa entre el tipo de cobertura terrestre y la calidad del agua.

[1] González- Rivas DA, Tapia- Silva FO, Bustillos J, Revollo-Fernandez DA, Beltrán- Morales LF, Lluch- Cota DB y Ortega-Rubio A. 2020. *Estimating Nitrogen Runoff from Agriculture to Coastal Zones by a Rapid GIS and Remote Sensing-Based Method for a Case Study from the Irrigation District Río Mayo, Gulf of California, México*. Front. Mar. Sci. 7:316. doi:10.3389/fmars.2020.00316

Tabla 1. Resumen metodológico

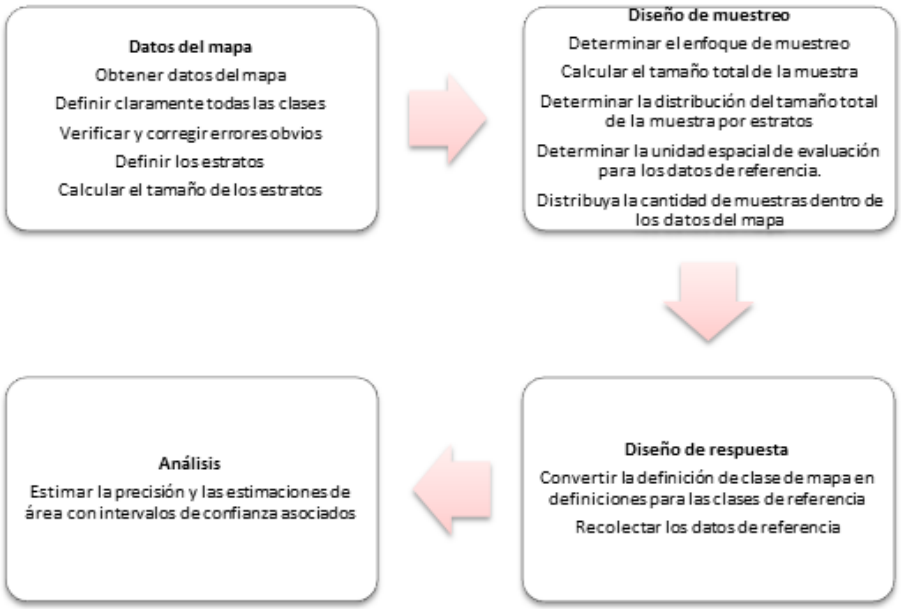
Apartados generales	Procesos
a) Estimación de la cobertura terrestre y evaluación de exactitud	Imágenes satelitales óptica, marzo (LANDSAT 2014,2015 y SENTINEL 2016, 2017, 2018, 2019) Random forest en Google Earth Engine Evaluación de la exactitud del método de Oloffson et al. (2014) y comité de cuenca
b) Determinación de áreas de captación hidrológica	Modelo digital de elevación SRTM 2014. Técnica de "quemado" Red de drenajes, dirección y acumulación de flujos Software: GRASS SIG
c) Relación cualitativa-visual entre el tipo de cobertura terrestre y calidad del agua por áreas de captación.	**Se consideran los contaminantes básicos, metales y patógenos** que señala la NOM-001-ECOL-1996. Software: ArcGis

Fuente: elaboración propia con base en Tapia-Silva et al., (2017) y González-Rivas et al., (2020)

Método de evaluación de la exactitud y estimación de las áreas

La exactitud se evalúa cada año con el método de Olofsson et al. (2014) que considera las fases de datos del mapa, diseño de muestreo estratificado, diseño de respuesta y análisis (figura 2). El índice Kappa no se utiliza para evaluar la exactitud debido a las deficiencias que presenta y argumentos científicos expuestos por Pontius y Millones (2011), Olofsson et al., (2014), Pontius y Santacruz (2014), FAO (2016) Foody (2020) para no utilizar este índice.

Figura 2. Método de evaluación de la exactitud y estimación de áreas



Fuente: elaboración propia basado en FAO (2016) y Olofsson et al., (2014)

RESULTADOS

Clasificación del tipo de cobertura terrestre

Para visualizar la cobertura terrestre, se clasificaron imágenes satelitales ópticas para el mes de marzo Landsat (2014, 2015) y Sentinel (2016, 2017, 2018, 2019) y se utiliza el método de clasificación de bosques aleatorios (random forest) en Google Earth Engine (GEE) considerando clases naturales (agua, vegetación y otras) y antropogénicas (asentamientos humanos, agricultura- pastizal).

Tabla 2. Cálculo general de muestra y escenarios para la evaluación de exactitud de clasificación de imágenes satelitales

Año	n	Escenario	S(Ọ)
2014	613	Proporcional	0.015686198
2015	505	Proporcional	0,01569357958
2016	708	Proporcional	0.0150908539
2017	515	Proporcional	0.016655865
2018	604	Proporcional	0.015852476
2019	572	Proporcional	0.016121446

Fuente: elaboración propia

La tabla anterior resume la toma de muestras realizadas para el periodo 2014-2019 las cuales se obtienen de la siguiente ecuación empleada en Olofsson et al., (2014):

$$n = \left(\frac{\sum W_i S_i}{S(\hat{O})}\right)^2$$

En donde *Wi* es la proporción de área mapeada de la clase i, cabe resaltar que *Wi* se obtuvo previamente de la división *A m,i y A tot*; entendiendo a la primera como el área mapeada de la clase i y a la segunda como el área total de las clases evaluadas en el mapa. Si, refiere a la desviación estándar de la clase y finalmente S(Ọ) es el error estándar esperado de la exactitud general, que para este caso osciló entre 0.015 y 0.016.

Conectividad hidrológica

Para delimitar las áreas de captación de la cuenca Río Los Perros, se procesan y analizan los datos sobre la morfología del relieve, la red hidrológica y las coordenadas de los sitios de monitoreo de calidad de agua de la red superficial operados por CONAGUA (2020) los cuales se definen como puntos de salida para

cada cuenca de captación en el Sistema de Información Geográfica (GRASS SIG 7.8). Utilizando esta herramienta se obtuvo una base de datos hidrológicos con información espacial.

Para el análisis de la morfología del relieve empleamos un modelo de elevación del *terreno Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) con resolución de 30 m, proyección UTM zona 15 y DATUM WGS84 combinado con la digitalización del mapa de canal de drenaje principal, obtenida de la Red Hidrográfica escala 1:50 000 - Cuencas edición 2.0, carta RH22A, INEGI 2010.

Los datos del modelo SRTM son una medida de las alturas del terreno y no una estimación por lo cual presenta mejores resultados de ajuste con los datos de terreno, sin embargo; puede presentar efectos de subestimación o sobreestimación según las condiciones locales del área de estudio (tipo de relieve y cobertura vegetal).

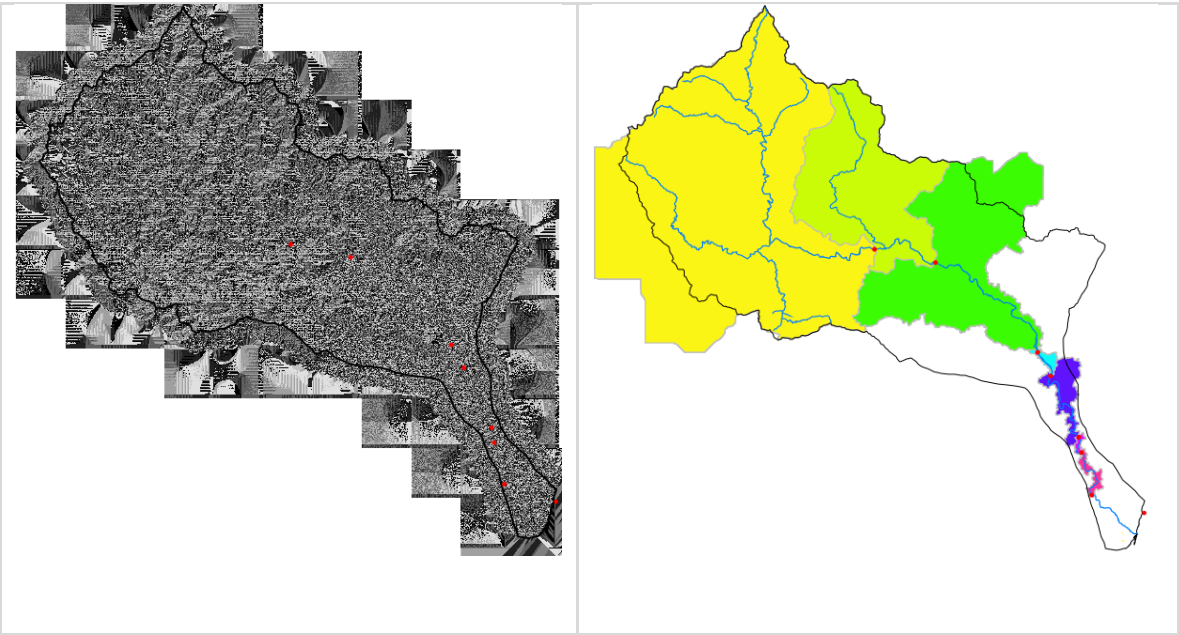
En nuestro caso, se presentó un efecto de subestimación en los canales de los arroyos en zonas de llanura de la cuenca estudiada, en los cuales mostró una zona de evacuación en lugar de una zona de acumulación por lo que fue *ajustado* mediante la aplicación de una técnica denominada como “quemado” de la red de drenajes que consiste en reducir el valor de elevación (-100) en los pixeles de los ríos digitalizados. Este proceso se realizó utilizando el software GRASS SIG 7.8.

Posteriormente, esta capa de ríos se resta del modelo de elevación digital para asegurarse de que la red de drenaje obtenida por el modelo coincidiera con la red de canales real. A partir de este nuevo modelo de elevación digital, utilizamos el módulo *r.watershed* del software GRASS GIS 7.8 para obtener los mapas de acumulación de flujo y dirección de drenaje con un parámetro límite (valor umbral de acumulación de flujo) de 500 celdas.

Con el mapa de dirección de drenaje procedemos a generar el mapa de áreas de captación (región aguas arriba de un punto de salida) utilizando el módulo *r.water.outlet* del software GRASS GIS 7.8 asignando como coordenadas de puntos

de salida requeridos, las coordenadas de los sitios de monitoreo de calidad de agua del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), CONAGUA 2020.

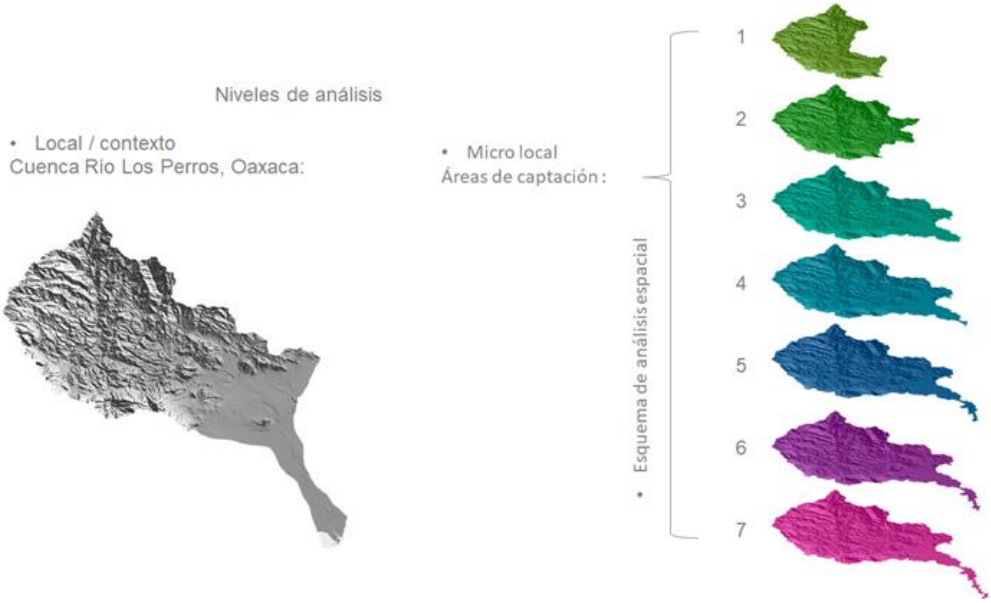
Figura 3. Cuenca río Los Perros, mapa de dirección de flujo y puntos de muestreo, y áreas de captación delimitadas. La línea azul representa la red hidrológica superficial del río Los Perros, Oax.



Fuente: elaboración propia

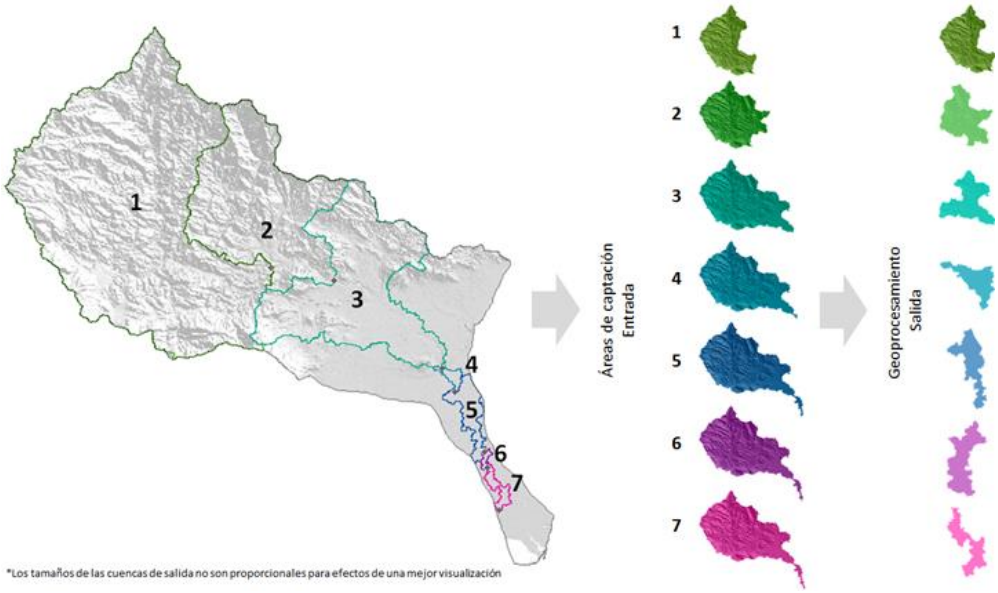
En la figura 4 se puede observar el razonamiento geográfico de las áreas de captación obtenidas del software GRASS GIS 7.8, que presentan una lógica de cuencas acumulativas, no obstante, se procedió a realizar un nuevo proceso para las áreas de captación, debido a que al realizar un primer acercamiento con los datos de calidad de agua se logró identificar que para algunos de ellos la lógica de acumulación no los explicaba. El nuevo proceso consistió en obtener áreas de captación puntuales y el resultado final se presenta en la figura 5.

Figura 4. Cuencas acumuladas del río Los Perros, Oaxaca.



Fuente: elaboración propia

Figura 5. Cuencas puntuales del río Los Perros, Oaxaca.



Fuente: elaboración propia

Análisis de patrones de precipitación

La variación de las condiciones hidrológicas está influida por las estaciones climáticas y sus efectos locales, principalmente lluvias y estiaje.

Dentro del área de estudio se ubican tres estaciones meteorológicas: Guichixu, Ixtepec y Juchitán de Zaragoza operadas por CONAGUA, los datos analizados fueron obtenidos en el portal del portal del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2020) de los cuales se obtuvo información de los patrones de información anual de lluvia (mm) y por periodo estacional del año de la lluvia promedio por estación meteorológica. (Observe anexo 1)

Debido a la evidente variación estacional de la lluvia en la cuenca, se seleccionaron las imágenes satelitales y los datos de monitoreo relativamente estables durante la estación seca de invierno, principalmente del mes de marzo.

Calidad de agua

El análisis de los parámetros de calidad de agua en los sitios de monitoreo operados por CONAGUA se realizó a lo largo de 6 años (2014-2019), se seleccionan las muestras correspondientes al mes de marzo.

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (NOM-001-ECOL-1996) establece los límites máximos permitidos de los parámetros de calidad del agua, en este proyecto se consideran los contaminantes básicos, patógenos y metales pesados y cianuros.

- Contaminantes básicos. Son aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales que pueden ser removidos mediante tratamientos convencionales. Este grupo se consideran: sólidos suspendidos totales (SST), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), el nitrógeno total (N), el fósforo total (P) y la temperatura (T).

- Contaminantes patógenos y parasitarios: Se consideran coliformes fecales debido a que son parte de los microorganismos y parásitos que representan un riesgo a la salud humana, flora o fauna.
- Metales pesados y cianuros. Dentro de un ecosistema pueden encontrarse libres y de forma natural pero también como consecuencia de actividades antropogénicas, por eso este grupo al igual que los anteriores, si se encuentra en concentraciones fuera de los límites, pueden producir efectos negativos en la salud humana, flora o fauna. Se consideran arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo, zinc y cianuros.

Relaciones entre cobertura terrestre y calidad del agua

Con base en la revisión de estudios de caso se establecieron las siguientes relaciones entre la cobertura terrestre y parámetros de calidad del agua.

Tabla 3. Tabla de relaciones entre cobertura terrestre y parámetros de calidad de agua

Cobertura terrestre	Parámetro de calidad de agua
+ Área construida	+ DBO + Ni + Cr + Coliformes fecales
+ Agricultura y pastizal	+ N + SST
+ Vegetación	+ P - T + Ni

Nota: +=mayor, -=menor

Fuente: elaboración propia con aportes de Torres-Beristáin et al., (2013), Pérez-Ortega et al., (2017), Amado-Álvarez et al., (2019), Noyola-Medrano et al. (2019) y González-Rivas et al., (2020).

El análisis cualitativo-visual para identificar estas relaciones es el resultado de observar gráficamente los porcentajes de cobertura terrestre y el comportamiento

de los parámetros de calidad de agua por área de captación de manera puntual y acumulativa.

Análisis de la calidad del agua en el río Los Perros

Durante el periodo de análisis de 2014 a 2019, los contaminantes básicos, metales pesados y cianuros se encontraron dentro de los límites permitidos por la norma, con excepción de los coliformes fecales. A continuación, se presenta el análisis de los contaminantes.

Los SST tienen un valor promedio de 15.60 mg/l, mientras que el valor mínimo a nivel general es de 10 mg/l, que se aprecia comúnmente en las áreas de captación 1, 2, 4, 5, 6 y 7. Este parámetro también presenta valores atípicos: 42 mg/l para el área de captación 7 el año 2016, 52.86 mg/l en el área de captación 2 y 39.72mg/l para el área de captación 3 del año 2018 y 31.54 para el área de captación 2 del año 2019.

La DBO tiene un valor promedio en la cuenca de 6.40, el valor mínimo es de 2 que se presenta comúnmente en las áreas de captación 1, 4 y 5. el máximo valor es de 103.99 mg/l en la cuenca 7 del año 2017, también se presentan valores atípicos como el 8.9 mg/l en el área de captación 2 del 2014, 7.6 mg/l en el área de captación 4 del 2016, 9.01 mg/l en el área de captación 6 de 2019 y de 8.26 mg/l en el área de captación 7 del 2019

El N tiene un valor promedio de 3.32 mg/l, el valor mínimo es de 0.207602 mg/l en el área de captación 1 del 2019 y el valor máximo de 39.5074 mg/l en 2017, y valores atípicos de 15.07066 mg/l en 2016, 6.195095 mg/l para el 2018 y 8.26 mg/ para el 2019 en el área de captación 7, lo que supondría el efecto acumulativo o escorrentía de este parámetro.

El P tiene un valor promedio de 0.55 mg/l, el valor máximo es de 5.65396 mg/l para el área de captación 7 en 2017. Los valores máximos por año se encuentran en el área de captación 7, de 2.672704 mg/l para el 2016, 0.82351mg/l para el 2018 y de

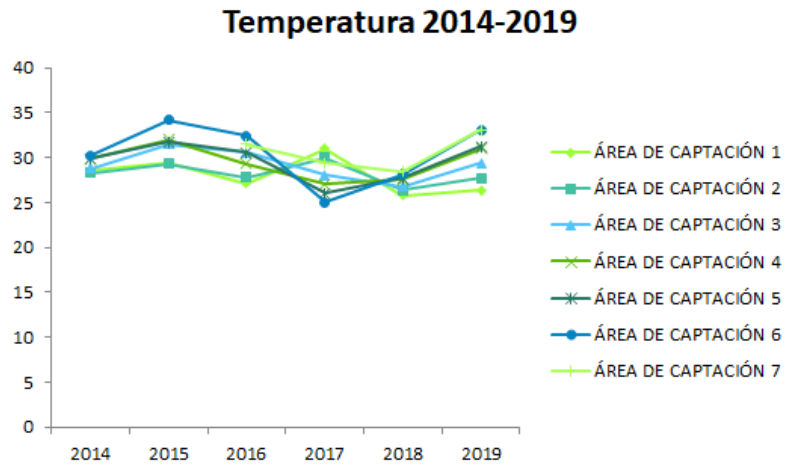
1.51369 mg/l para el 2019, lo que supondría el efecto acumulativo o la escorrentía de este parámetro. (Observe anexos 2 y 3)

En relación con los metales pesados, ninguno sobrepasa los límites permitidos por la NOM- 001-SEMARNAT.

Con relación a la temperatura, los valores se encuentran dentro de los permitidos por la norma, para uso agrícola, urbano y para la protección de la vida acuática. Durante el periodo de análisis, para los años 2015, 2016 y el año 2019 en las primeras 3 áreas de captación se registran valores inferiores a 30°C lo cual refleja el carácter acumulativo o enfoque de cuencas.

A diferencia del año 2017 la temperatura inicia con valores superiores a 30°C en las dos primeras cuencas que van disminuyendo hasta el área de captación 6 en donde tiene un repunte, por lo que se infiere un comportamiento puntual. La cuenca 7 presenta un mayor porcentaje de área construida y pastizal, y así como porcentajes inferiores a 16% en vegetación, lo que expresa una mayor absorción de calor.

Figura 6. Gráfica de temperatura para las áreas de captación de la cuenca río de los perros



Fuente: Elaboración propia con base a los parámetros de calidad de agua obtenidos de CONAGUA 2019.

Incidencia de la cobertura terrestre y calidad de agua del río los perros

Este proyecto visualiza las relaciones entre la cobertura terrestre y los parámetros de calidad de agua en las áreas de captación de la cuenca de forma acumulativa y puntual.

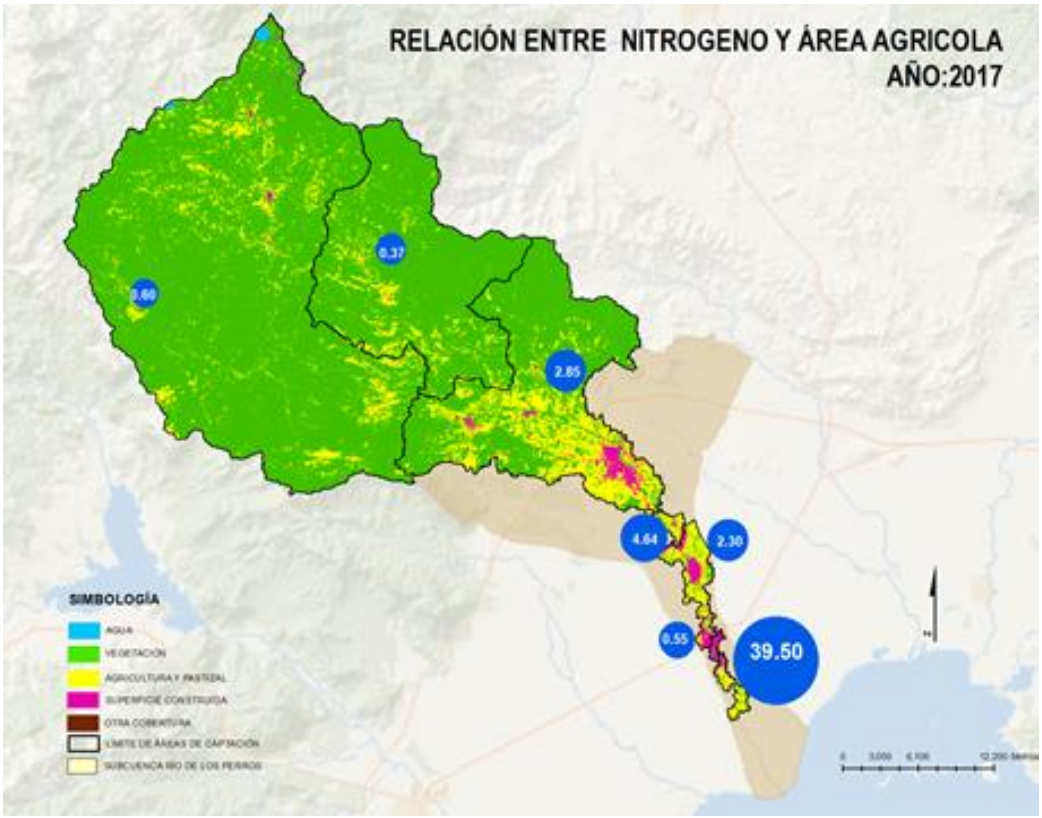
I. Cobertura terrestre y contaminantes básicos

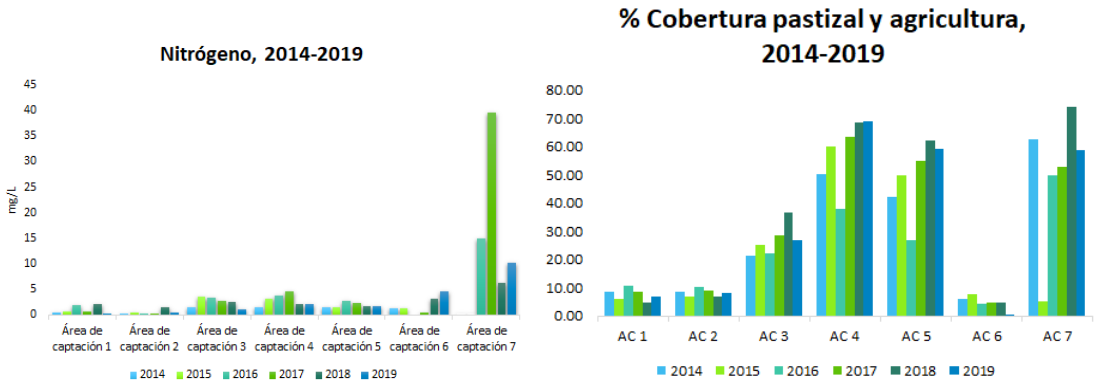
Relación entre el nitrógeno y el área agrícola

La presencia de nitrógeno (N) está relacionada directamente con el área agrícola, esta relación se confirma de manera puntual en el área de captación 7 del año 2017, donde se tienen un porcentaje de 28.67% de cobertura agrícola. Para los años 2015 y 2019, se observan porcentajes reducidos de esta clase de cobertura en las áreas de captación 1 y 2 (7.02%-5.01% y 7.58%- 4.78%), lo que se refleja en niveles más bajos de N. Observe figura 7

Esta relación es similar a la encontrada en la cuenca del río Juqueri, Brasil mediante correlaciones canónicas (Pérez-Ortega et al., 2017) así como a la relación estimada para el distrito de riego mayo en Sonora (González-Rivas et al., 2020).

Figura 7. Relación nitrógeno y área agrícola





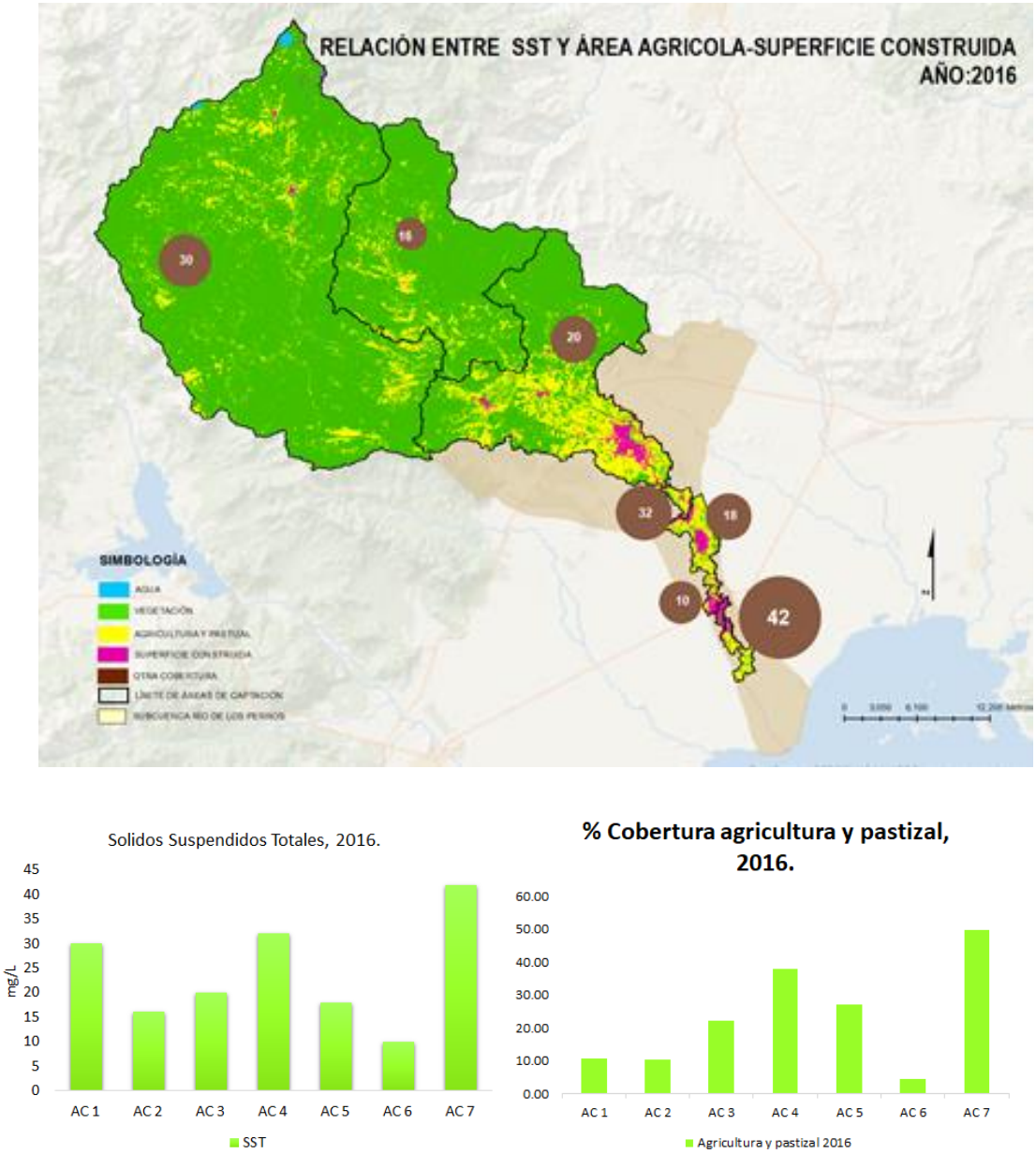
Fuente: elaboración propia

Relación entre sólidos suspendidos totales y el área agrícola

La presencia de sólidos suspendidos totales (SST) se relaciona con la cobertura agrícola y la superficie construida; en este estudio destaca la relación de los SST con la cobertura agrícola del área debido a la presencia del parámetro en el área de captación 7 del año 2016 como se menciona en párrafos anteriores, donde se

presenta la mayor presencia de SST de 42 mg/L y un área agrícola del 49.36%. Esta relación también es encontrada en la cuenca hidrográfica urbana del río Rojo (Menezes et al., 2016) y en la cuenca del río Juqueri, Brasil (Pérez-Ortega et al., 2017).

Figura 8. Relación entre sólidos suspendidos totales, área agrícola y superficie construida



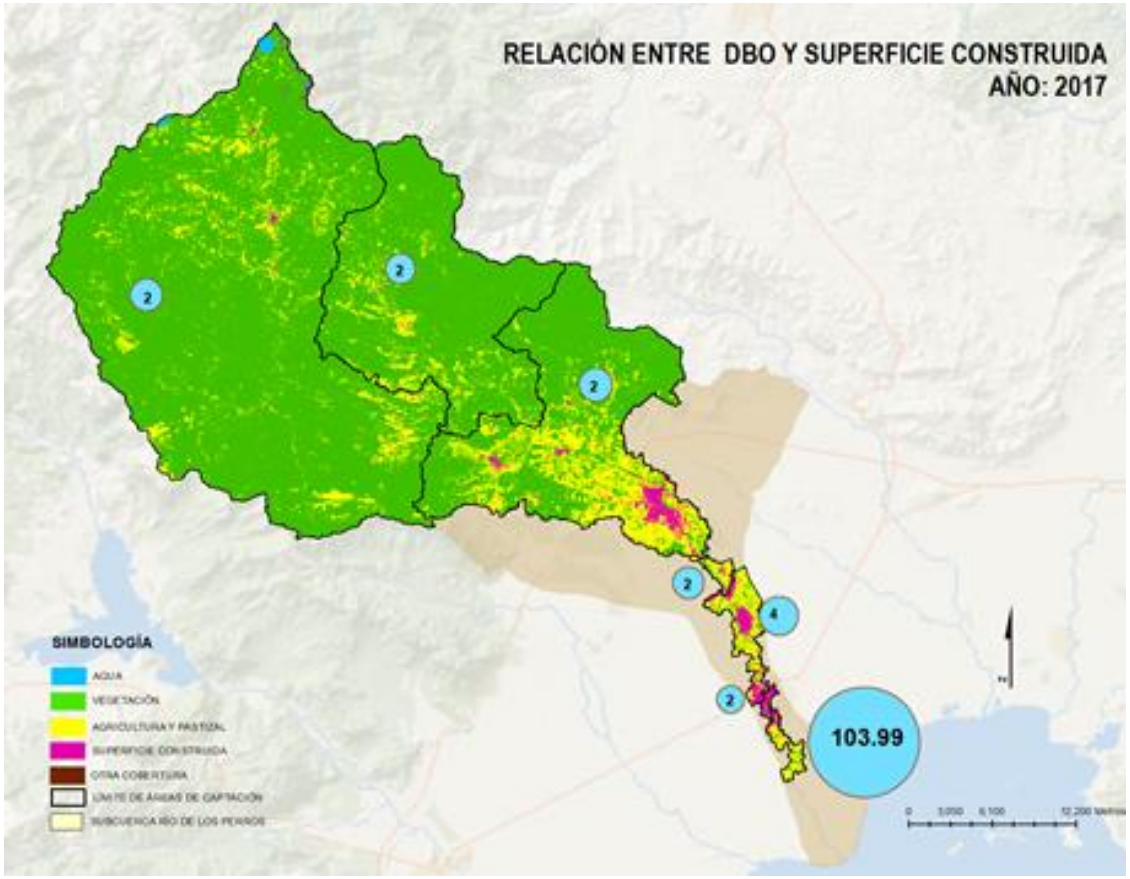
Fuente: elaboración propia

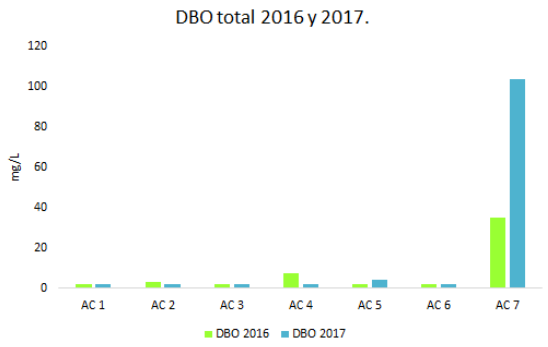
Relación entre la demanda bioquímica de oxígeno y las áreas construidas

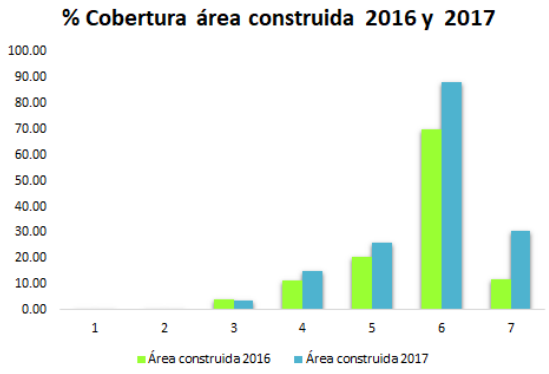
De acuerdo con Muñoz-Nava et al., (2011) la mayor presencia de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) está relacionada con una mayor área construida. Esta relación se confirma en este proyecto, en el área de captación acumulada 7 de los años 2016 y 2017, debido a la acumulación de materia orgánica, desechos domésticos e industriales. (Observe figura 9)

La relación se explica debido a que las aguas del alcantarillado de una ciudad se componen de desechos domésticos e industriales; cuanto mayor sea DBO, mayor es la contaminación orgánica (Ferreira 2010), la cual es confirmada mediante correlaciones lineales en el estudio de Muñoz-Nava el al., (2011) para la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala México

Figura 9. Relación entre demanda bioquímica de oxígeno y superficie construida







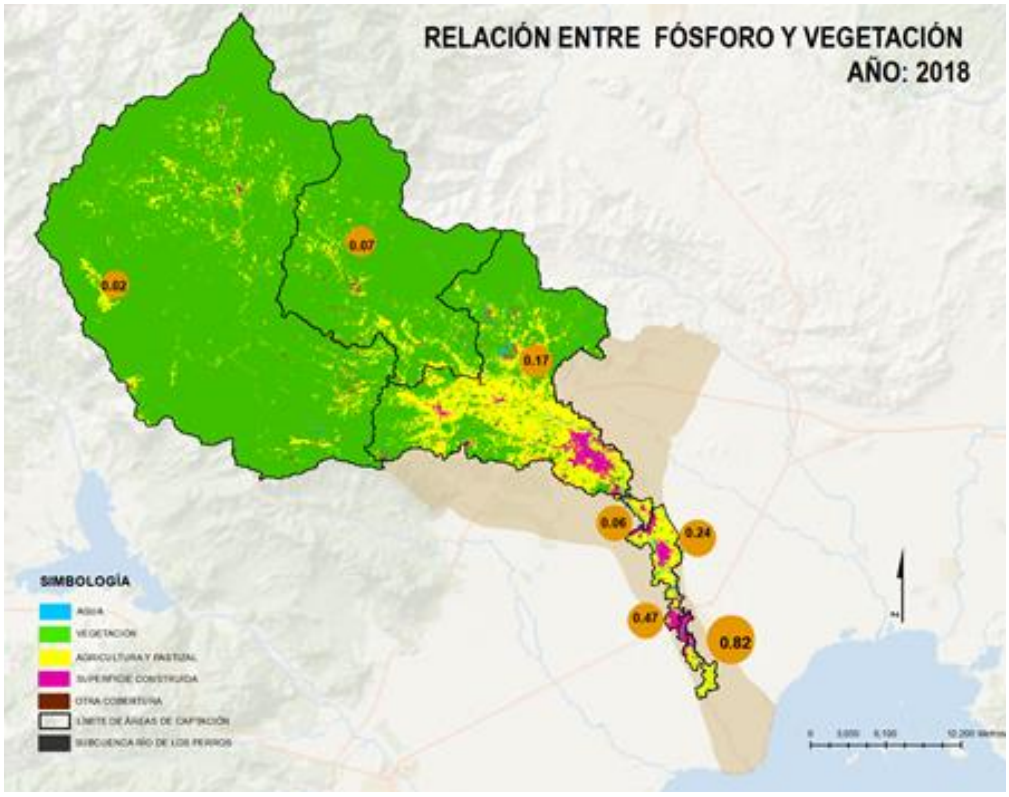
Fuente: elaboración propia

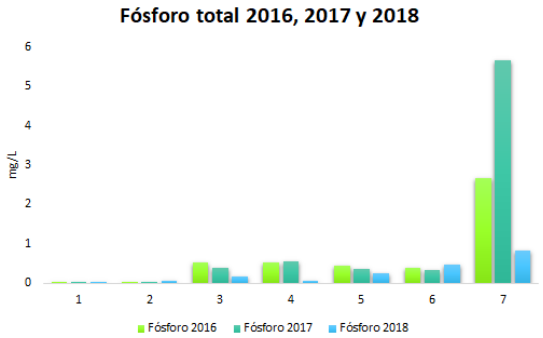
Relación entre el fósforo y las áreas de vegetación

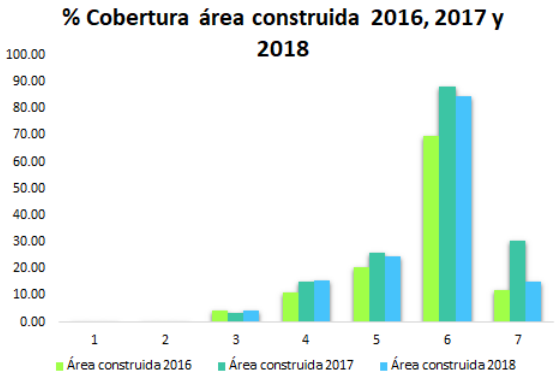
La mayor presencia de fósforo (P) está relacionado con una mayor área de vegetación según Malavolta (1996), Cunha y Calijuri (2011), Pérez-Ortega et al., (2017) y Moreno-Jiménez (2017). En este proyecto, la relación de P y vegetación tiene un comportamiento acumulativo o de escorrentía en la cuenca 7 de 2016, 2017 y 2018. De manera puntual, en el área de captación 4 del 2015 ya que se observa una disminución del 50% P y un 40% en la vegetación.

Esta relación se debe al papel que desempeñan los bosques sobre el ciclo de carbono y los nutrientes minerales, así como la retención de agua en el suelo y a la simbiosis de sus raíces con micorrizas Malavolta (1996). Esta relación también es encontrada embalse de Itupararanga, São Paulo (Cunha y Calijuri 2011) y en la cuenca Juqueri (Pérez-Ortega et al., 2017).

Figura 10. Relación entre Fósforo y vegetación







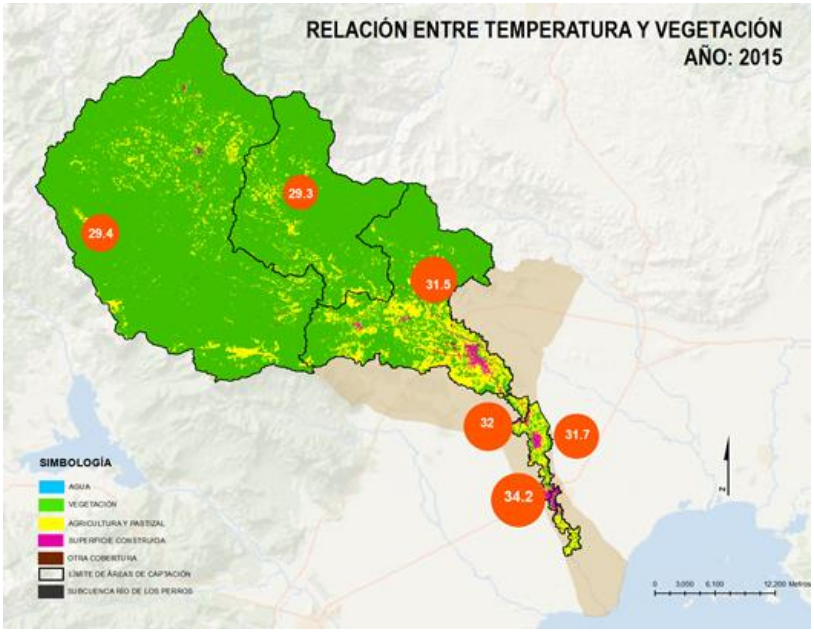
Fuente: elaboración propia

Relación de la temperatura con las áreas de vegetación

La mayor temperatura está relacionada con una menor área de vegetación. El estudio de González Hernández et al., (2015) observa que las zonas deforestadas presentan mayores temperaturas que las arboladas. Esta relación se observa de manera puntual dentro de las áreas de captación 6 y 7 del río de los perros, debido

a que en la parte baja de la cuenca se registran las menores superficies de vegetación y las mayores temperaturas, de manera específica para el área de captación del año 2019, los porcentajes oscilan entre 0.11% y el 2% de cobertura vegetal mientras que su temperatura supera los 30°C.

Figura 11. Relación entre temperatura y vegetación



Fuente: elaboración propia

II. Metales pesados

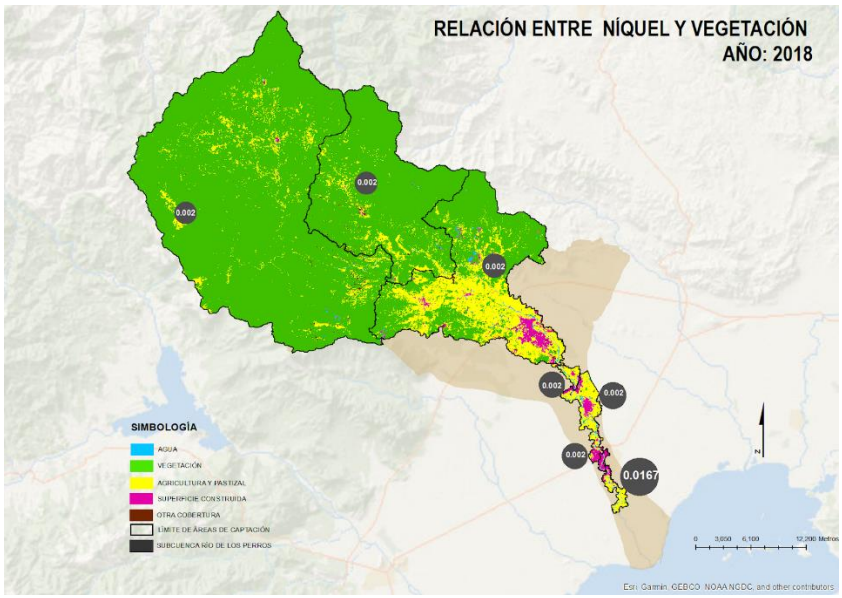
Relación entre el níquel y la vegetación - áreas construidas

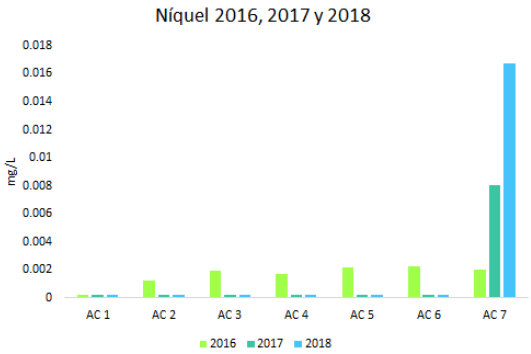
La mayor presencia de níquel (Ni) está relacionada con una mayor área de vegetación y áreas construidas. Esta relación se confirma con el área de captación 7 del 2017 y 2018 que concentra la mayor cantidad de Ni producto de la escorrentía superficial; y a nivel puntual se observa la relación con el área construida.

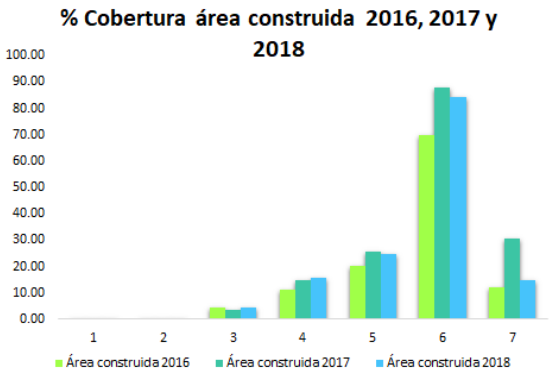
La relación con las áreas de vegetación se muestra en la importancia del níquel para para el crecimiento y el metabolismo de las plantas; para los mamíferos y las aves se ha demostrado que la carencia de níquel puede provocar deficiencias en el crecimiento y la reproducción (Larios-Bayona, 2014). A nivel puntual, la relación con

las áreas construidas se debe a la combustión de la gasolina (Galán y Romero, 2008).

Figura 12. Relación gráfica entre níquel y superficie construida







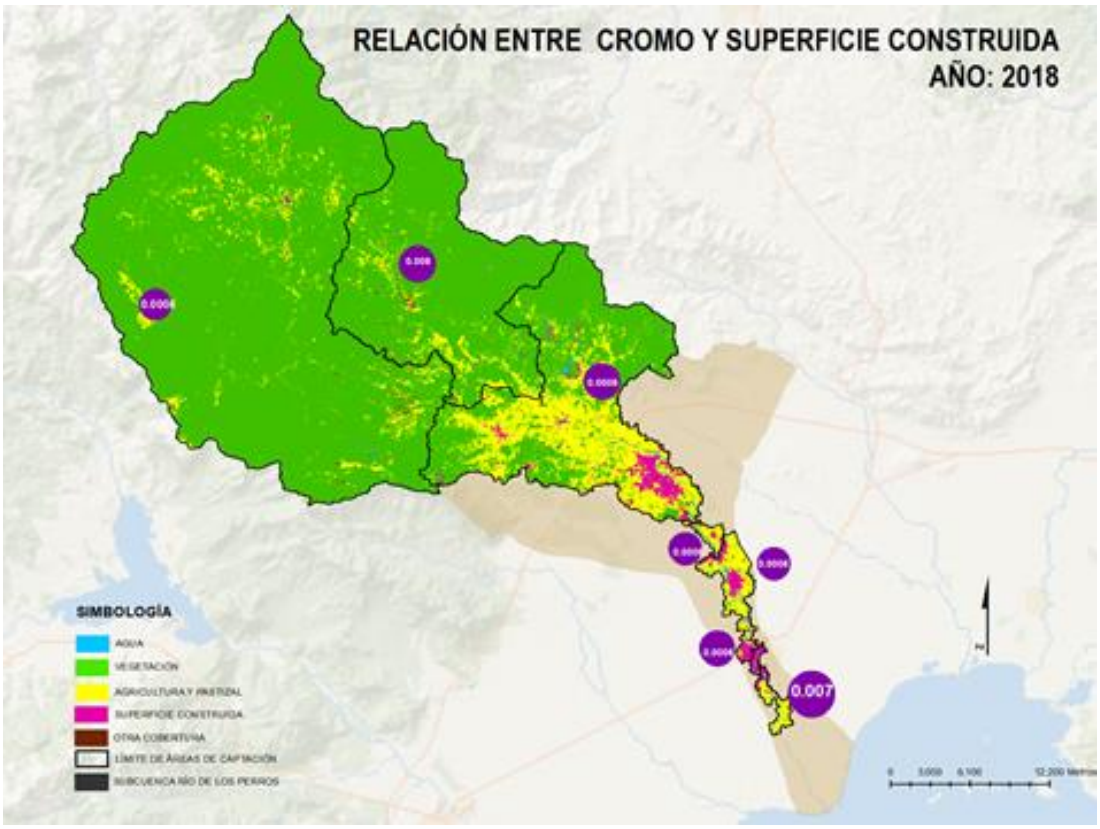
Fuente: elaboración propia

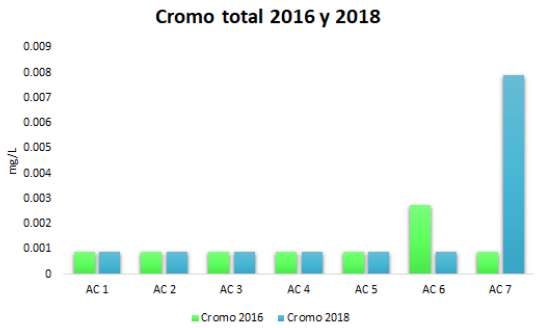
Relación entre el cromo y las áreas construidas

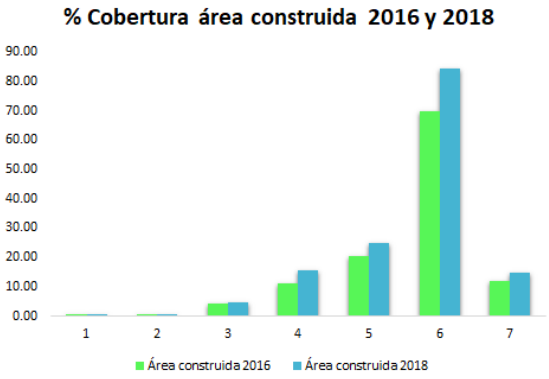
La mayor presencia de cromo está relacionada con una mayor área construida. Esta relación se encuentra en el área de captación puntual 6 del 2015 y 2016 donde el área construida supera el 70% y para el 2018, se observa el efecto anulativo por el arrastre de este metal.

De acuerdo con Larios-Bayona en su estudio de la cuenca del río Turia (2014) esta relación se debe a la escorrentía de las aguas sin tratamiento que son vertidas a sus cauces.

Figura 13. Relación entre cromo y superficie construida







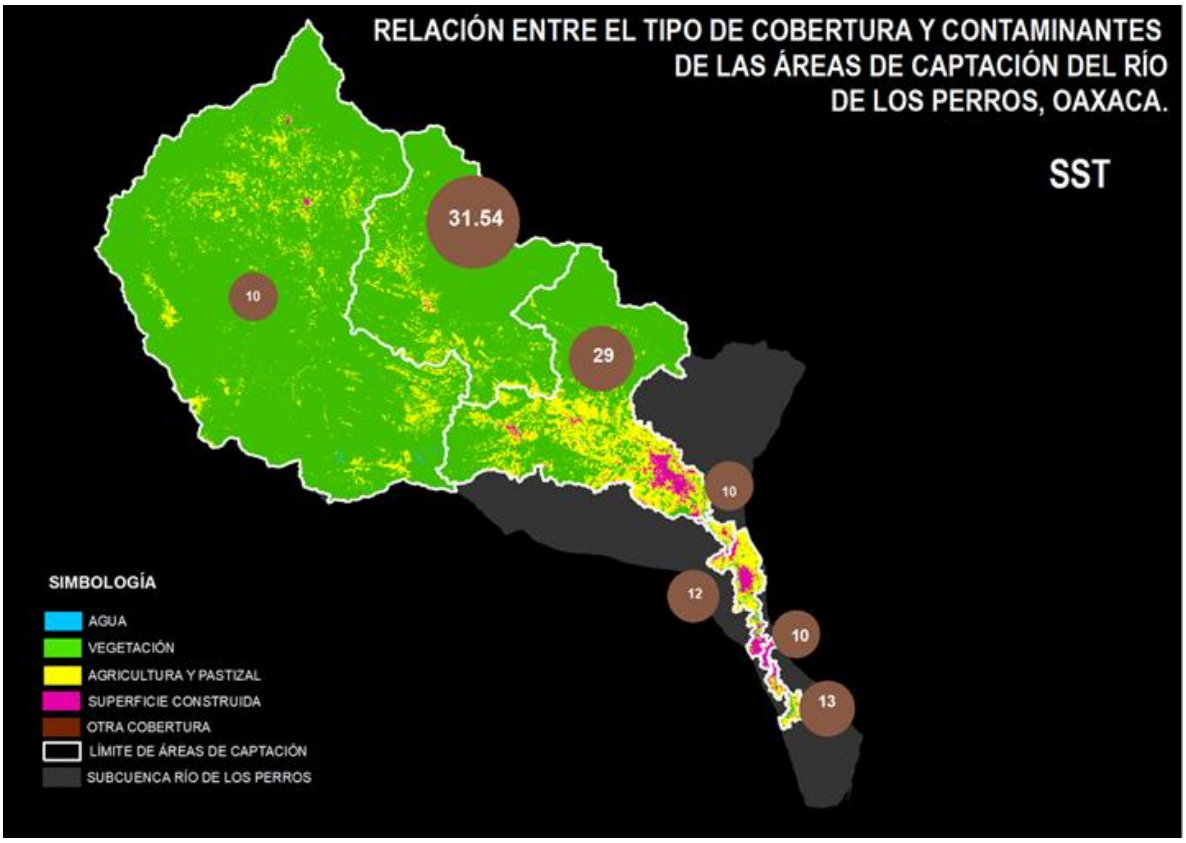
Fuente: elaboración propia

Relación entre coliformes fecales y las áreas construidas

La mayor presencia de coliformes está relacionada con una mayor área construida; es el parámetro que sobrepasa los límites permitidos por la norma y puede explicarse por la red de drenaje que es vertida al río. Esta relación se confirma en la cuenca del río seco en Veracruz (Torres-Beristáin et al., 2013), Juqueri, Brasil (Pérez-Ortega et al., 2017) Temuco, Chile (Rivera et al., 2010) ya que la presencia de bacterias coliformes es un indicio inminente de que el agua está contaminada y sus orígenes pueden ser aguas negras u otro tipo de desechos en descomposición.

Finalmente se presenta la relación entre cobertura y contaminantes básicos de las áreas de captación del río de los perros al año 2019, en un mapa digital con movimiento, con el propósito de evidenciar la situación actual y el registro de parámetros de calidad de agua.

Figura 14. Mapa relacional cobertura terrestre y contaminantes año 2019

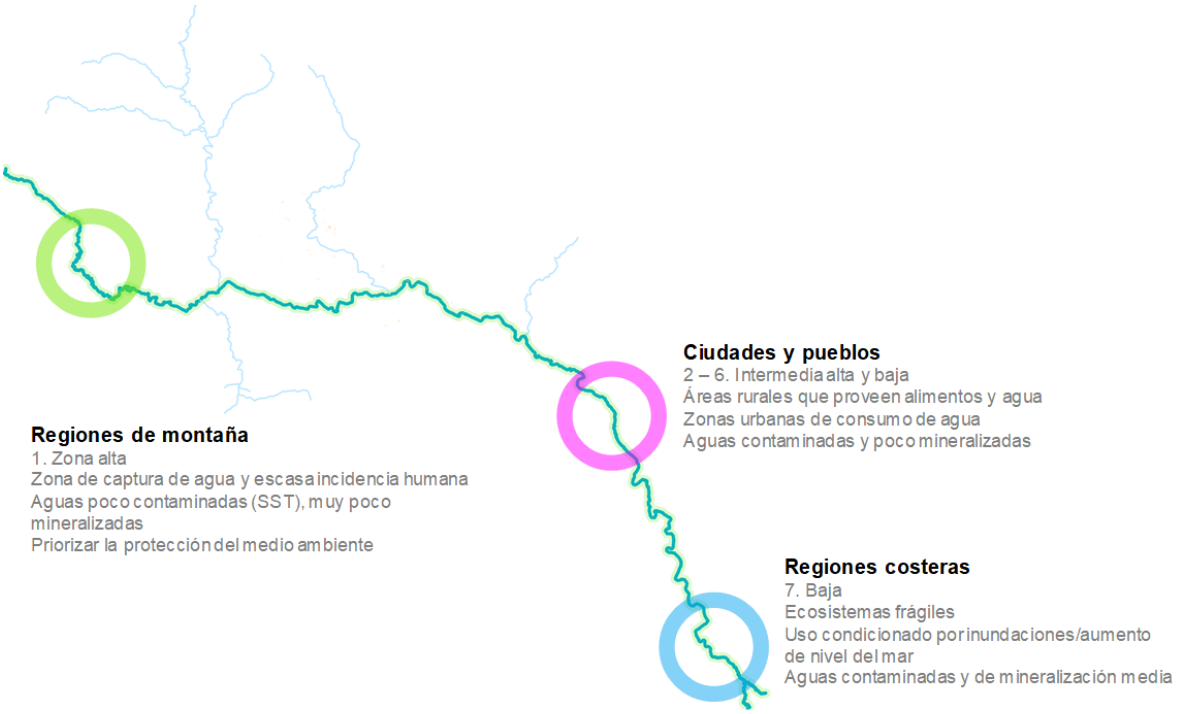


Fuente: elaboración propia

Sectorización de las áreas de captación

Se ha sectorizado las áreas de captación en tres diferentes zonas funcionales (alto, medio y bajo) partir de la función hidrológica específica que desempeñan (Cotler, et al., 2010) con el objetivo de emitir o diseñar una serie de recomendaciones propuestas que contribuyan a mantener un adecuado funcionamiento eco hidrológico de la cuenca.

Figura 15. Esquema Río Los Perros, Oaxaca



Acciones para la restauración hidrológica ambiental

El desarrollo de esta metodología implica ir **“de lo micro a lo macro”** en función de la planeación urbana y ordenamiento ecológico.

a) Área de colecta o captación
b) Área de almacenamiento hídrico y desalojo
c) Zona de descarga o salida de la cuenca

CONCLUSIONES

- Este proyecto explora cualitativamente las relaciones entre el uso de suelo y los parámetros de calidad de agua.
- Los parámetros de calidad de agua están dentro de los límites permitidos por la NOM con excepción de los coliformes fecales.
- El incremento de la agricultura-pastizal y las áreas construidas tienen una relación positiva con el incremento del N, SST y la DBO. Además, con los metales Níquel y cromo
- La presencia de la vegetación en la parte alta ayuda a regular el clima en la zona
- El crecimiento de las áreas construidas aumenta los coliformes fecales que son vertidos al río.
- En relación con la metodología:
- La utilidad y efectividad del procesamiento de imágenes en Google Earth Engine
- El método de Olofsson et al., (2014) es útil para para evaluar la exactitud y estimar el área de clases
- Las áreas de captación permiten visualizar mejor la contribución del punto de muestreo de calidad de agua y los tipos de cobertura terrestre

La propia delimitación de áreas de captación o microcuencas constituyen una acción que pueden permitir la identificación de áreas conservadas, degradadas y en riesgo de degradación a escalas pertinentes, así como la vinculación con los objetivos y estrategias del Instrumento de Gestión de la Cuenca Río Los Perros, 2016.

BIBLIOGRAFÍA

Amado-Álvarez, Jesús, Pérez-Cutillas, Pedro, Alatorre-Cejudo, Luis Carlos, Ramírez-Valle, Orlando, Segovia Ortega, Elsa Fabiola, & Alarcón-Cabañero, Juan José. (2019). Análisis multiespectral para la estimación de la turbidez como indicador de la calidad del agua en embalses del estado de Chihuahua, México. *Revista Geográfica de América Central*, (62), 33-61. Doi:10.15359/rgac.62-1.2

Cotler H. y Caire G. (2009). Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F., México. 380 pp.

Cotler H., Garrido A., Bunge V. y Cuevas M.L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: Priorización y toma de decisiones. En: Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización (H. Cotler, Ed.). Instituto Nacional de Ecología-Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. México D.F., México. pp. 210-215.

Cotler H., Garrido A., Mondragón R. y Díaz A. (2007). Delimitación de las cuencas hidrográficas de México a escala 1: 250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Instituto Nacional de Ecología y Comisión Nacional del Agua. Documento técnico. México D.F. 35 p

Foody Giles (2020) Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification, Remote sensing of environment 239, 111630. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111630

González-Rivas DA, Tapia-Silva FO, Bustillos-Guzmán JJ, Revollo-Fernández DA, Beltrán-Morales LF, Lluch-Cota DB and Ortega-Rubio A (2020) Estimating Nitrogen Runoff From Agriculture to Coastal Zones by a Rapid GIS and Remote Sensing-Based Method for a Case Study From the Irrigation District Río Mayo, Gulf of California, México. *Frontiers Marine. Science.* 7:316. Disponible en 10.3389/fmars.2020.00316

Guo, Q. H., Ma, K. M., Liu, Y. & He, K. (2010) Testing a dynamic complex hypothesis in the analysis of land use impact on lake water quality. *Water Resources Management* 24(7), 1313–1332. Disponible en https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-009-9498-y

Kiedrzyńska E, Jóźwik A, Kiedrzyński M, Zalewski M. Hierarchy of factors exerting an impact on nutrient load of the Baltic Sea and sustainable management of its drainage basin. *Marine Pollution Bulletin.* 2014 Nov;88(1-2):162-173. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.09.010.

Liu, W., Zhang, Q. and Liu, G. (2012), Influences of watershed landscape composition and configuration on lakewater quality in the Yangtze River basin of China. *Hydrological Processes*., 26: 570-578. Disponible en 10.1002/hyp.8157

Maass J.M. y Cotler H. (2007). Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas. En: El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental (H. Cotler, Ed.). Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México D.F., México, pp. 41-58.

NOM-001-ECOL-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. 6 de enero de 1997.

Noyola-Medrano, C., Ramos-Leal, J. A., Lopez-Alvarez, B., Moran-Ramirez, J., & Fuentes-Rivas, R. M. (2019). Assessing the source and spatial distribution of chemical composition of a rift lake, using multivariate statistical analysis, hydrogeochemical modeling and remote sensing. *Earth Sciences Research Journal*, 23(1), 43-55. DOI:10.15446/esrj.v23n1.66429

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., Wulder, M. A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148:42–57. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.015

Ozbay G, Fan C and Yang Z. 2017. Relationship between Land Use and Water Quality and Its Assessment Using Hyperspectral Remote Sensing in Mid-Atlantic Estuaries In Book: Water Quality (Editors: Tutu H and Grover BPC) In Tech Open Publisher, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia. ISBN 978-953-51-2881-6. Chapter 9: 169-222. Book Chapter.

Pontius Jr Robert Gilmore & Millones Marco (2011) Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment, International Journal of Remote Sensing, 32:15, 4407-4429. Doi: 10.1080/01431161.2011.552923

Pontius Robert Gilmore Jr & Santacruz Alí (2014) Quantity, exchange, and shift components of difference in a square contingency table, International Journal of Remote Sensing, 35:21, 7543-7554, DOI: 10.1080/2150704X.2014.969814

Qiang, C. et al. (2016) Impacts of land use and population density on seasonal surface water quality using a modified geographically weighted regression. *Science of the total environment* 572, 450–466. Doi:10.1016/j.scitotenv.2016.08.052

Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales y C. de Haan. (2006). Livestock's Long Shadow, Environmental Issues and Options, FAO, Roma, Italia. Disponible en http://www.fao.org/3/a0701e/a0701e00.htm

Tapia Silva, F. O., López Flores E. (2017): "Variabilidad espacio-temporal de la cobertura terrestre en la cuenca del río Tecolutla, México", GeoFocus (Artículos), nº 20, p. 163-182. ISSN: 1578-5157. Doi:10.21138/GF.564

Torres Beristáin, Beatriz, González López, Gloria, Rustrián Portilla, Elena, & Houbron, Eric. (2013). Enfoque de cuenca para la identificación de fuentes de contaminación y evaluación de la calidad de un río, Veracruz, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(3), 135-146.

Vera C.J. (2005). Stakeholder participation in Mexican water policy. Environmental Sociology Series, Wageningen University. Wageningen, Holanda. 150 pp. Disponible en https://agua.org.mx/biblioteca/stakeholder-participation-in-mexican-water-policy/

Wang, X., Zhang, F. (2018) Effects of land use/cover on surface water pollution based on remote sensing and 3D-EEM fluorescence data in the Jinghe Oasis. *Scientific Reports* **8,** 13099. Doi: 10.1038/s41598-018-31265-0

ANEXOS

1.Patrones de precipitación

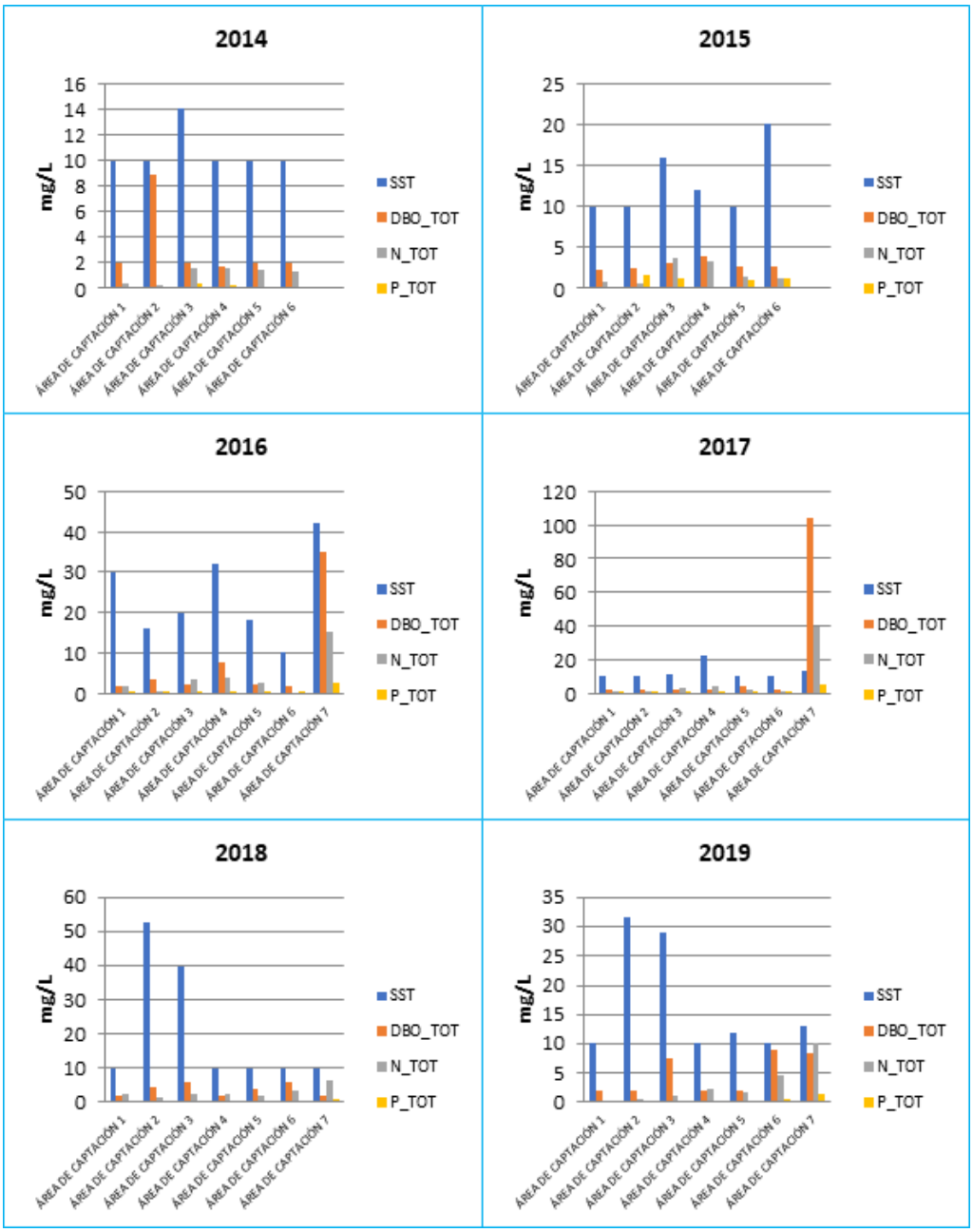
Estación	Nombre	Municipio	Lluvia (mm)													
			2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019	
20330	Guichixu	Santiago Laollaga	2.4	95.5	1.1	70.7	0.5	23.7	1.1	81	2.2	53.5	0.5	43.3	0	0
20039	Ixtepec	Ciudad Ixtepec	2.5	80.6	1.7	75	0.1	4.9	-	-	-	-	-	-	1.3	70.5
20048	Juchitán de Zaragoza	H. Ciudad de Juchitán de Zaragoza	3.6	197.9	2.9	140.1	1.8	140.3	-	-	4.8	161	0.4	23.4	0.1	4.7
Lluvia promedio																
Lluvia máxima																

Fuente: Elaboración propia con base en Información Estadística Climatológica, CONAGUA

Estación	Lluvia promedio (mm)																				
	2013			2014			2015			2016			2017			2018			2019		
	I	J	G	I	J	G	I	J	G	I	J	G	I	J	G	I	J	G	I	J	G
Primavera	1.8	1.3	2.9	1.3	2.5	0.2	0.1	2.9	0.5	-	-	-	-	9.7	-	-	0.8	1.4	2.3	0	0
Verano	6.3	9.8	5.7	2.2	5.1	2.5	-	3.2	1	-	-	2.4	-	6.4	2.7	-	-	0	2.9	-	-
Otoño	1.8	3.2	1.1	2.8	4.2	1.6	-	0	0	-	-	0.5	-	3	2.7	-	-	0.4	-	-	-
Invierno	0.1	0	0	0.3	0	0.2	0	0	0	-	-	0	-	0	0	-	0	0	0	0.1	0
Estaciones Climatológicas	I: Ixtepec J: Juchitán de Zaragoza G: Guichixu																				

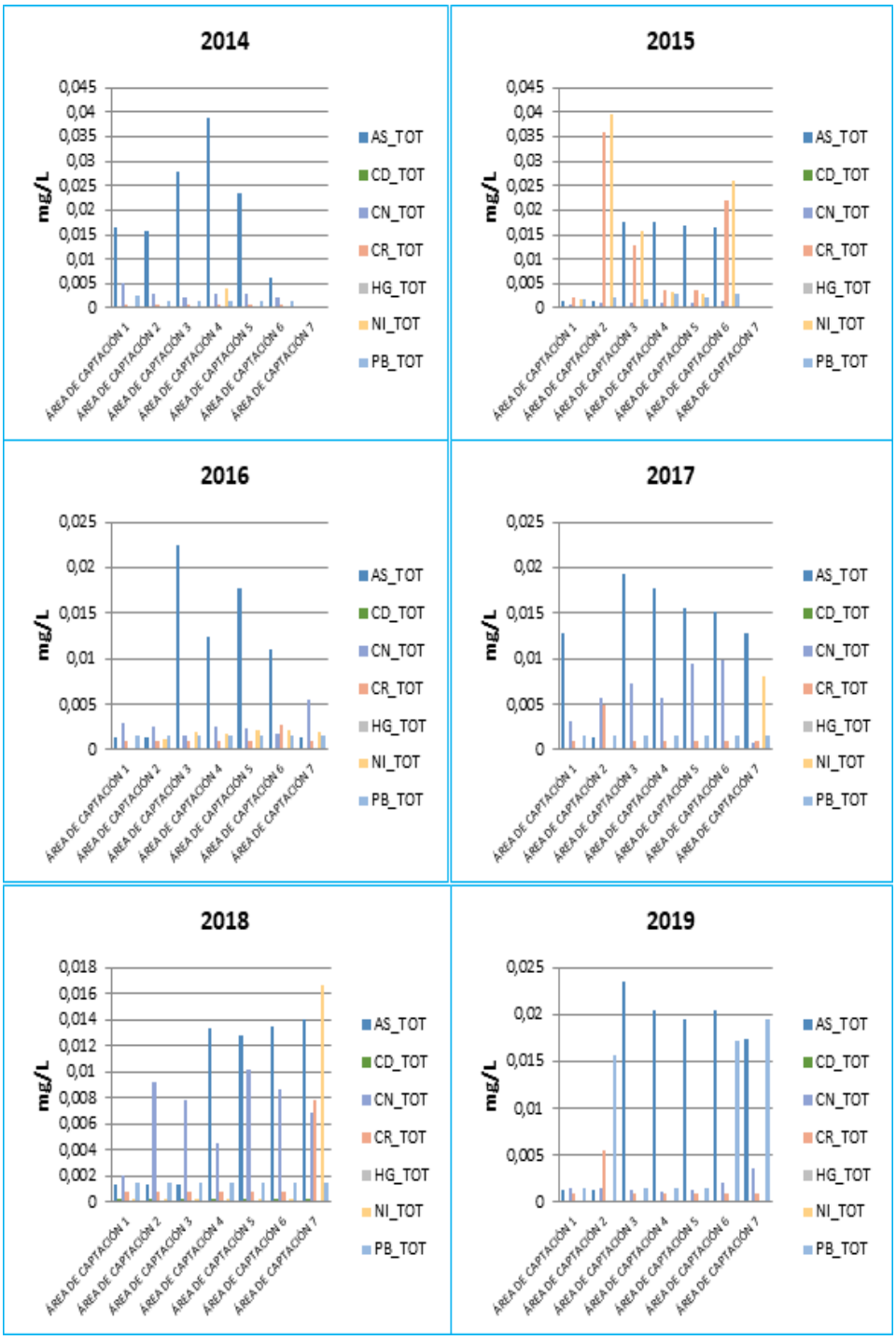
Fuente: Elaboración propia con base en Información Estadística Climatológica, CONAGUA

2. Parámetros básicos de calidad de agua en las áreas de captación del río de los perros.



Fuente: Elaboración propia con base a los parámetros de calidad de agua, obtenidos del portal de CONAGUA, 2019.

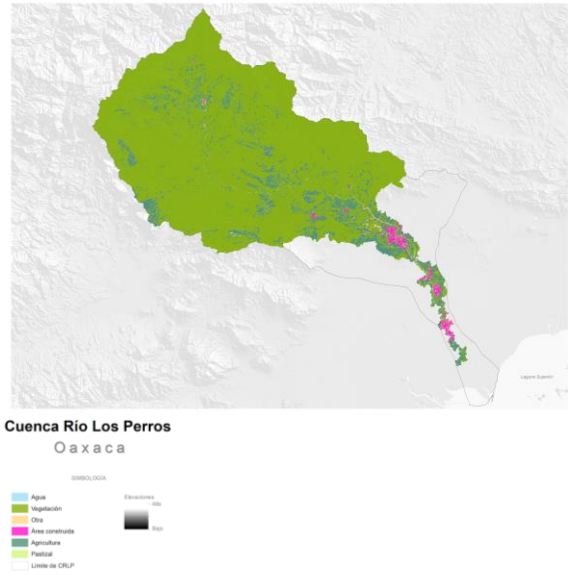
3. Metales y cianuros en las áreas de captación del río de los perros.



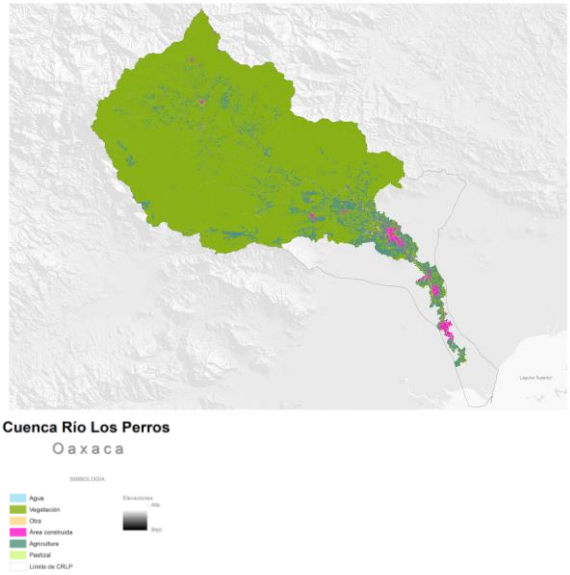
Fuente: Elaboración propia con base a los parámetros de calidad de agua, obtenidos del portal de CONAGUA, 2019.

4. Resultados de clasificación de imágenes satelitales por áreas de captación acumuladas

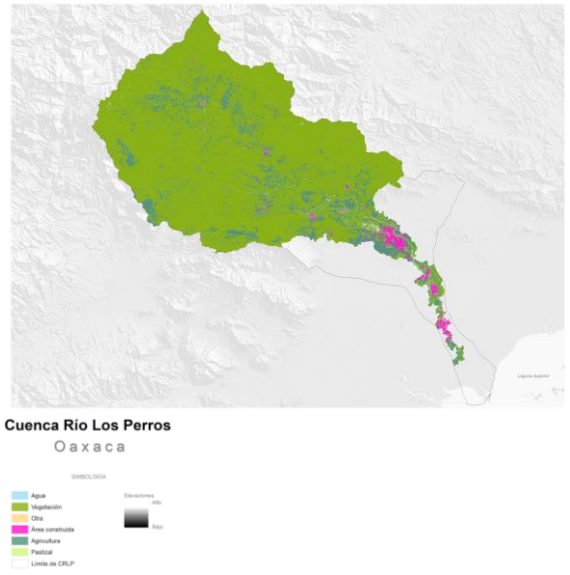
Año 2014



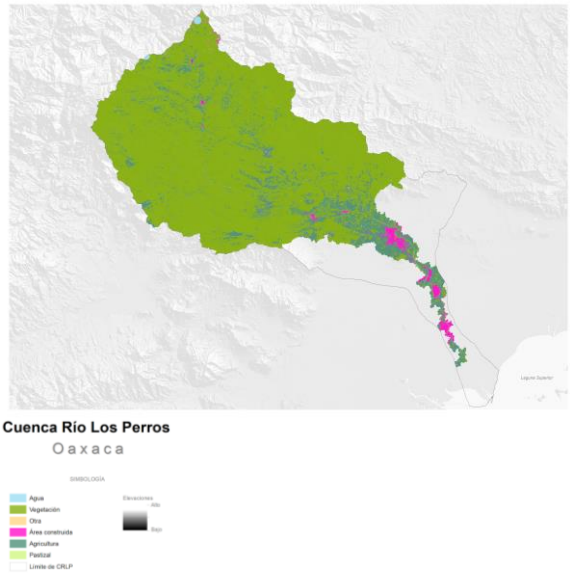
Año 2015

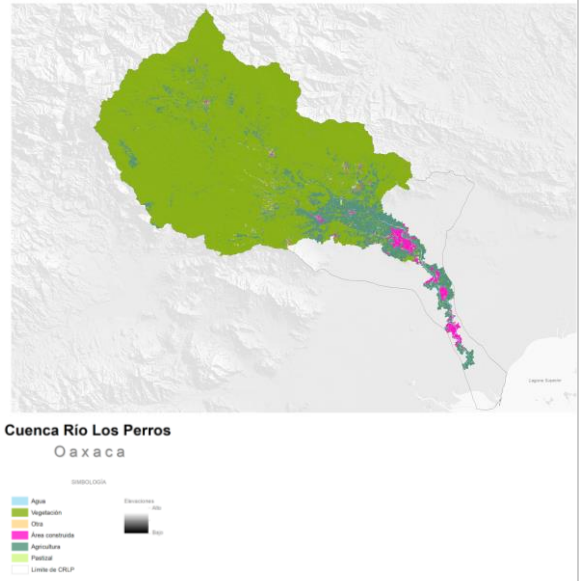
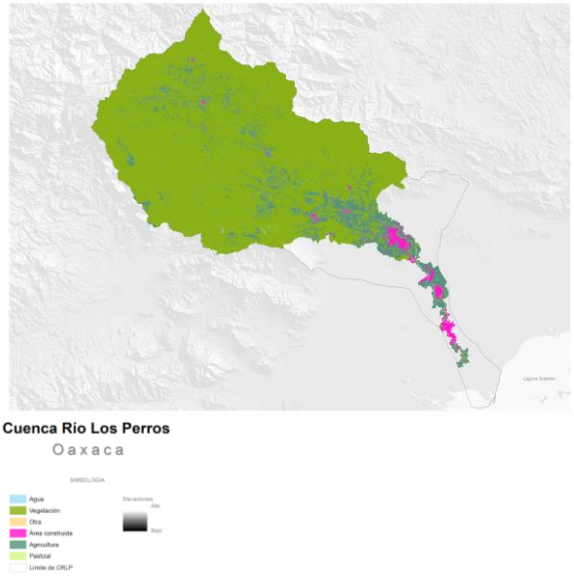


Año 2016

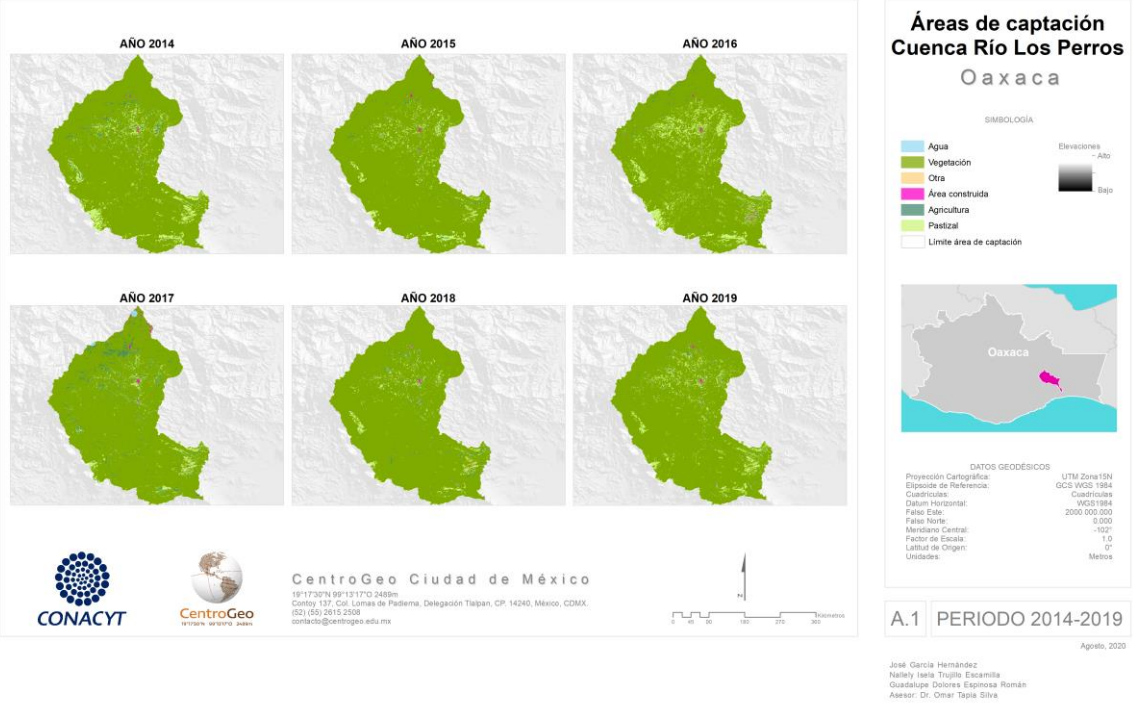


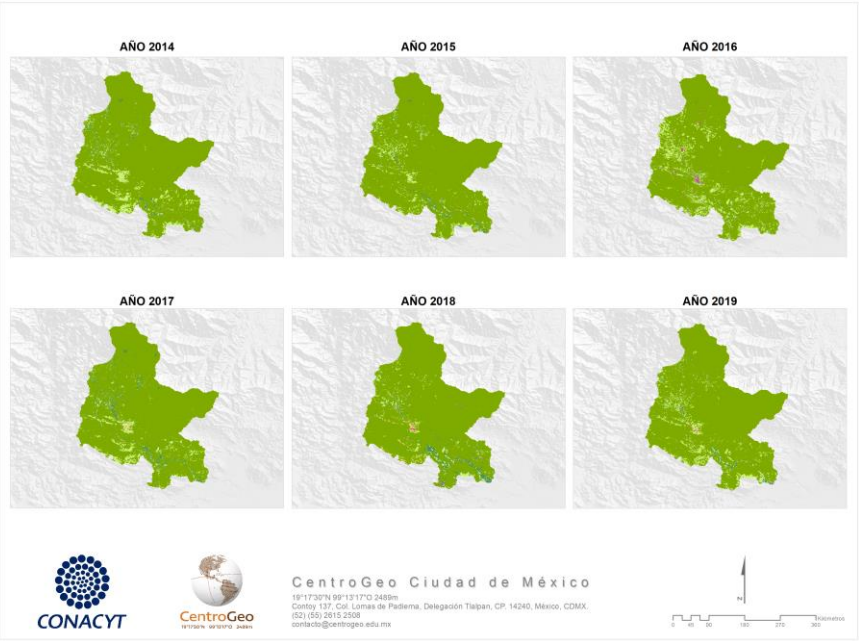
Año 2017

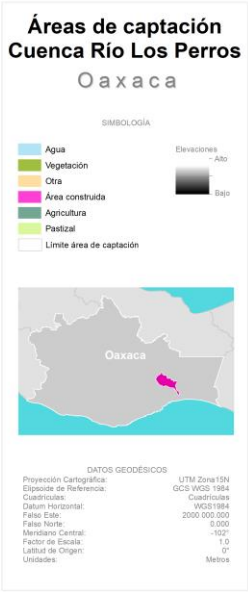


Año 2018	Año 2019
	

4. Resultados de clasificación de imágenes satelitales por área de captación



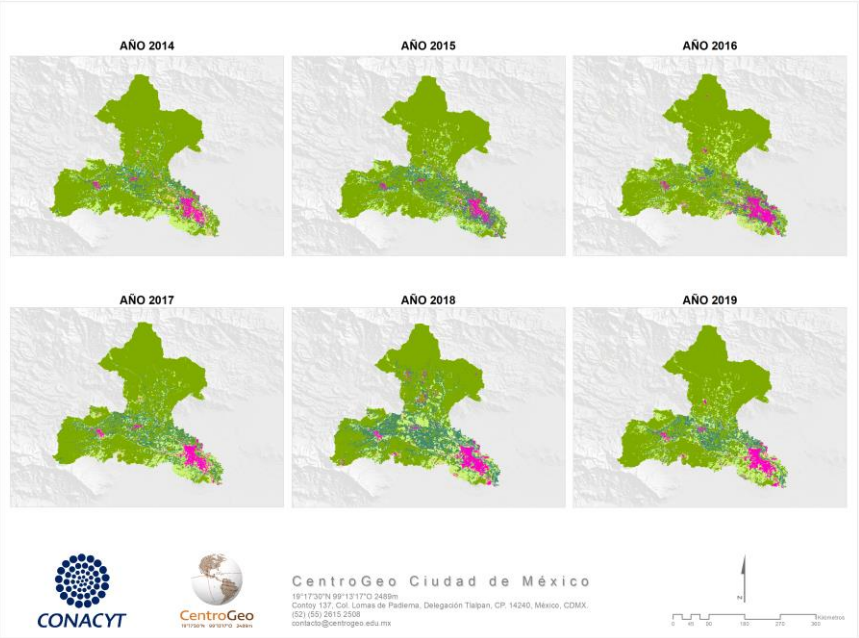




A.2 PERIODO 2014-2019

Agosto, 2020

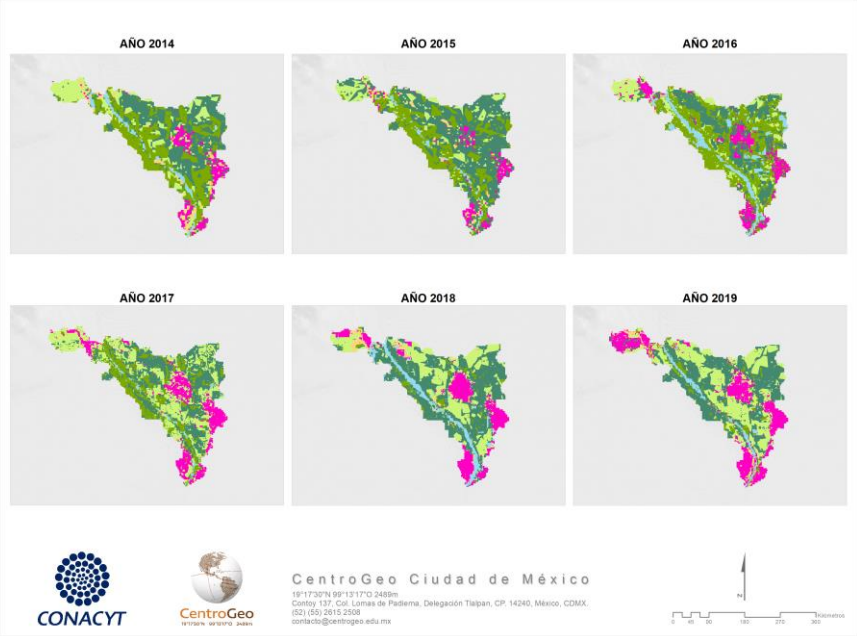
José García Hernández
Nallely Isela Trujillo Escamilla
Guadalupe Dolores Espinosa Román
Asesor: Dr. Omar Tapia Silva



A.3 PERIODO 2014-2019

Agosto, 2020

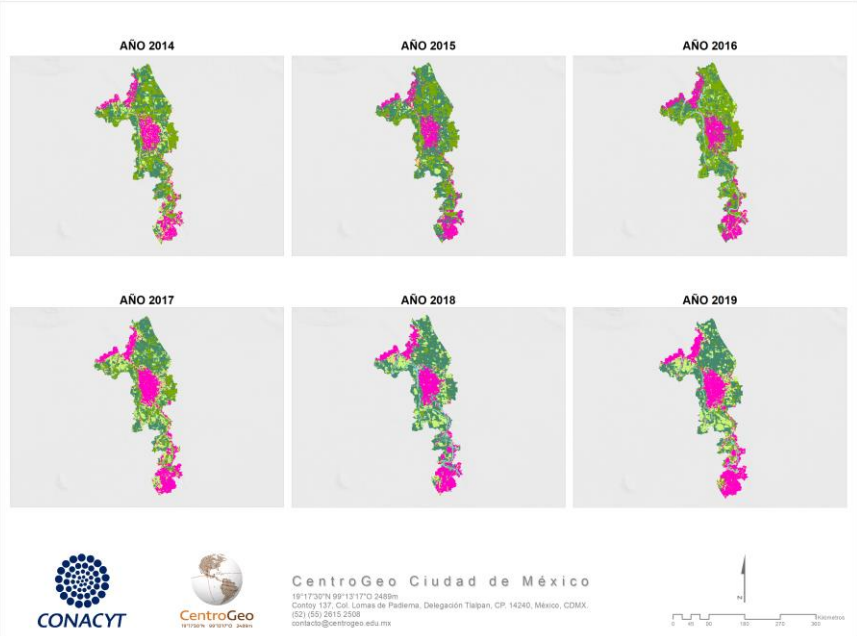
José García Hernández
Nallely Isela Trujillo Escamilla
Guadalupe Dolores Espinosa Román
Asesor: Dr. Omar Tapia Silva



A.4 PERIODO 2014-2019

Agosto, 2020

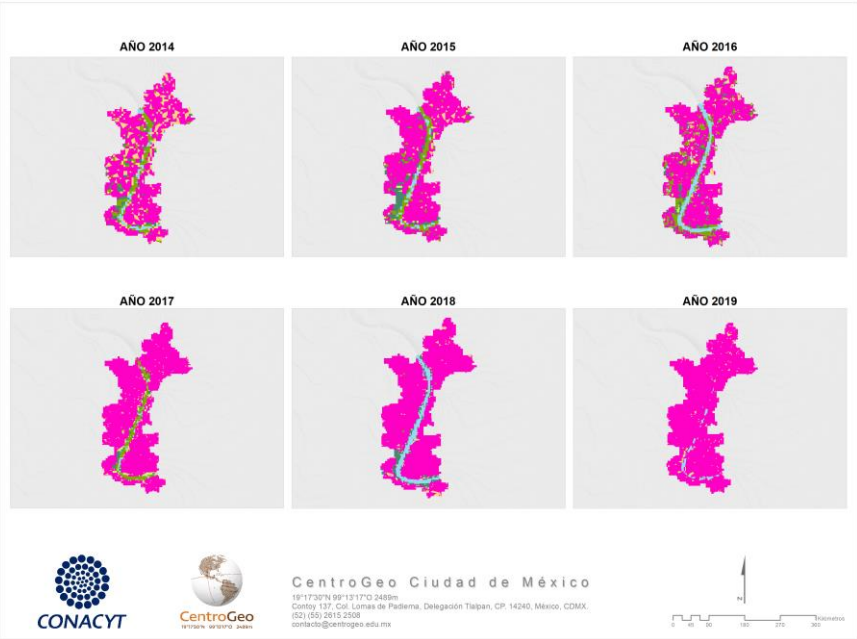
José García Hernández
Nallely Isela Trujillo Escamilla
Guadalupe Dolores Espinosa Román
Asesor: Dr. Omar Tapia Silva



A.5 PERIODO 2014-2019

Agosto, 2020

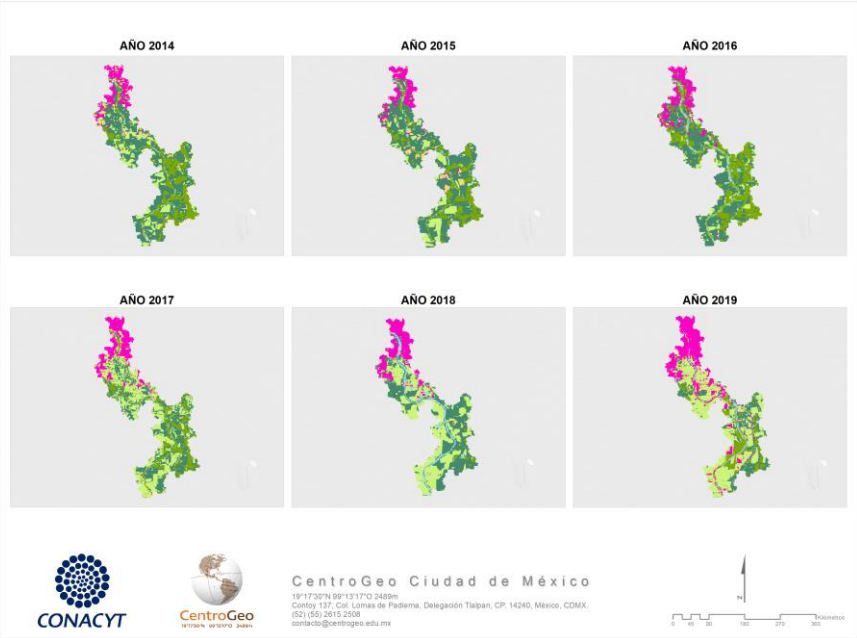
José García Hernández
Nallely Isela Trujillo Escamilla
Guadalupe Dolores Espinosa Román
Asesor: Dr. Omar Tapia Silva



A.6 PERIODO 2014-2019

Agosto, 2020

José García Hernández
Nallely Isela Trujillo Escamilla
Guadalupe Dolores Espinosa Román
Asesor: Dr. Omar Tapia Silva

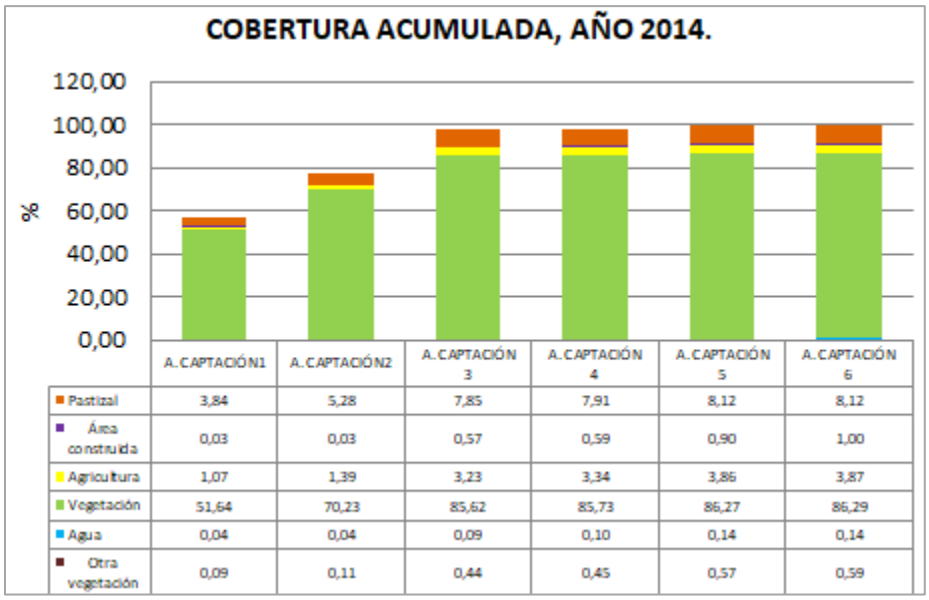


A.7 PERIODO 2014-2019

Agosto, 2020

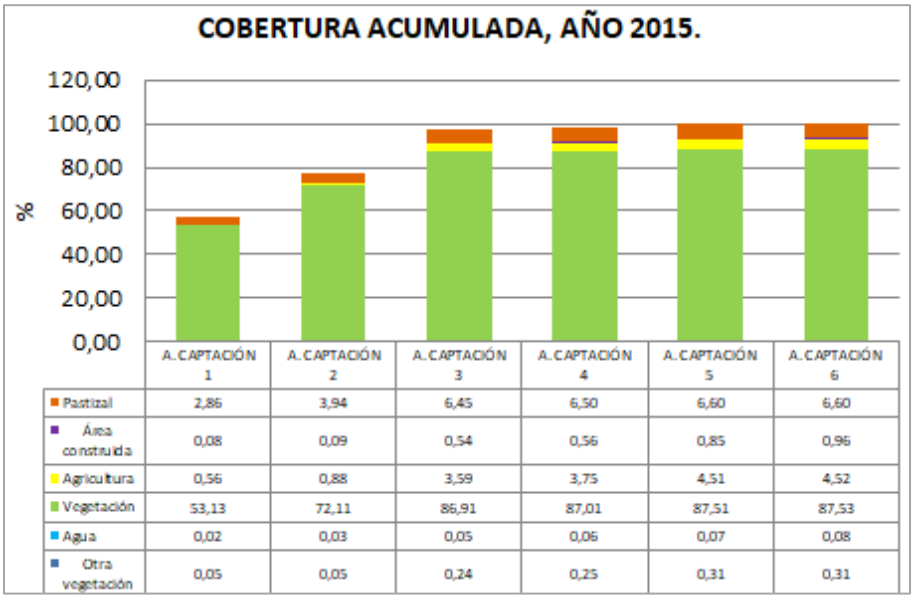
José García Hernández
Nallely Isela Trujillo Escamilla
Guadalupe Dolores Espinosa Román
Asesor: Dr. Omar Tapia Silva

5. Porcentajes de cobertura terrestre por área de captación acumulada del periodo 2014-2019



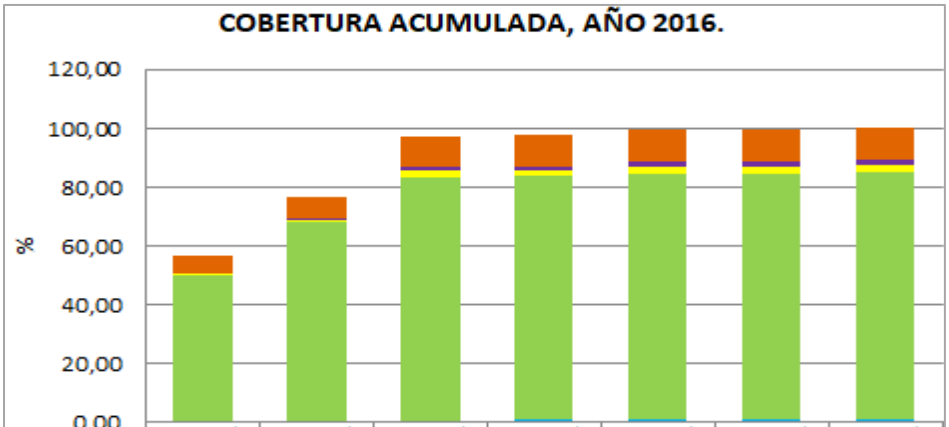
	A.CAPTACIÓN1	A.CAPTACIÓN2	A.CAPTACIÓN 3	A.CAPTACIÓN 4	A.CAPTACIÓN 5	A.CAPTACIÓN 6
Pastizal	3,84	5,28	7,85	7,91	8,12	8,12
Área construida	0,03	0,03	0,57	0,59	0,90	1,00
Agricultura	1,07	1,39	3,23	3,34	3,86	3,87
Vegetación	51,64	70,23	85,62	85,73	86,27	86,29
Agua	0,04	0,04	0,09	0,10	0,14	0,14
Otra vegetación	0,09	0,11	0,44	0,45	0,57	0,59

Fuente: Elaboración propia con base la clasificación supervisada (método random forest) para marzo del año 2014.



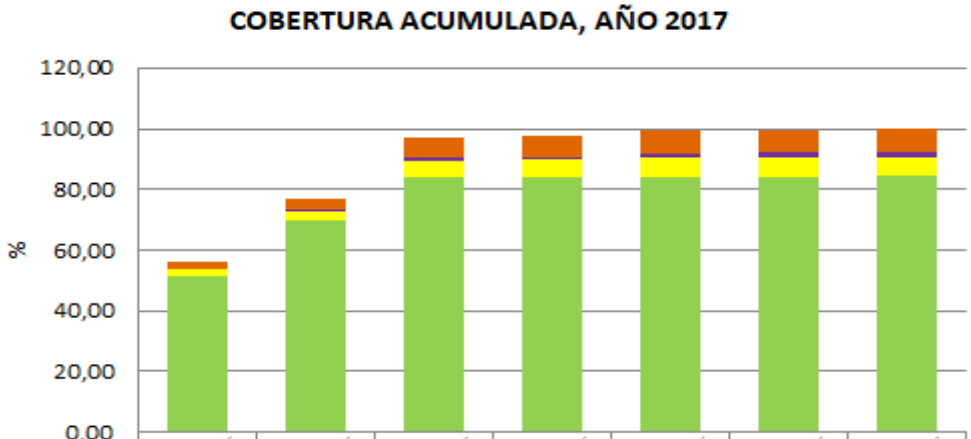
	A.CAPTACIÓN 1	A.CAPTACIÓN 2	A.CAPTACIÓN 3	A.CAPTACIÓN 4	A.CAPTACIÓN 5	A.CAPTACIÓN 6
Pastizal	2,86	3,94	6,45	6,50	6,60	6,60
Área construida	0,08	0,09	0,54	0,56	0,85	0,96
Agricultura	0,56	0,88	3,59	3,75	4,51	4,52
Vegetación	53,13	72,11	86,91	87,01	87,51	87,53
Agua	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08
Otra vegetación	0,05	0,05	0,24	0,25	0,31	0,31

Fuente: Elaboración propia con base la clasificación supervisada (método random forest) para marzo del año 2015.



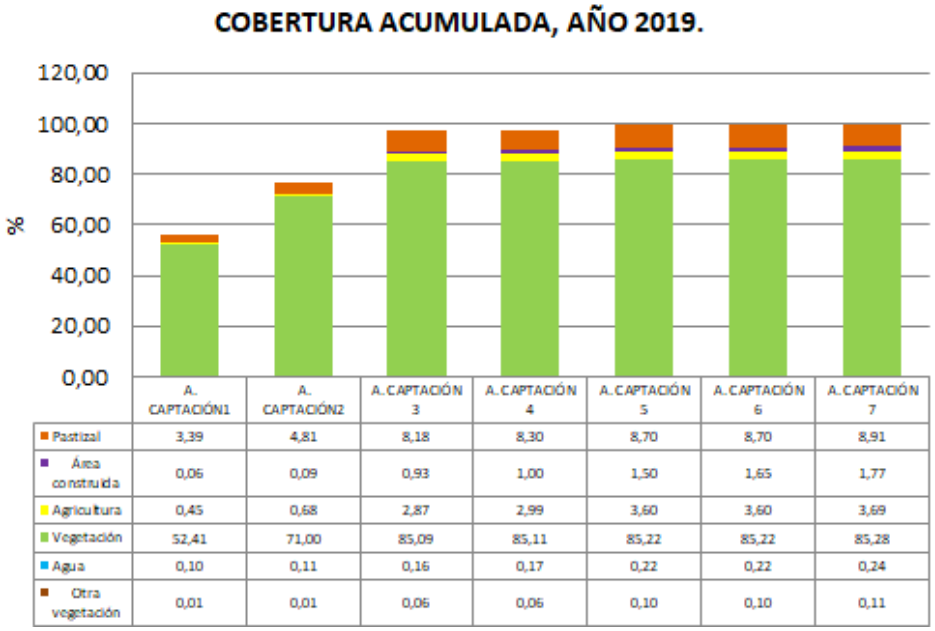
	A. CAPTACIÓN 1	A. CAPTACIÓN 2	A. CAPTACIÓN 3	A. CAPTACIÓN 4	A. CAPTACIÓN 5	A. CAPTACIÓN 6	A. CAPTACIÓN 7
Pastizal	5,63	7,57	10,70	10,74	10,82	10,82	10,87
Área construida	0,09	0,15	1,03	1,07	1,42	1,52	1,58
Agricultura	0,46	0,62	2,08	2,17	2,55	2,56	2,77
Vegetación	50,11	68,19	82,93	83,06	83,81	83,83	84,00
Agua	0,10	0,14	0,42	0,46	0,58	0,59	0,62
Otra vegetación	0,02	0,03	0,13	0,13	0,16	0,17	0,17

Fuente: Elaboración propia con base la clasificación supervisada (método random forest) para marzo del año 2016.



	A. CAPTACIÓN 1	A. CAPTACIÓN 2	A. CAPTACIÓN 3	A. CAPTACIÓN 4	A. CAPTACIÓN 5	A. CAPTACIÓN 6	A. CAPTACIÓN 7
Pastizal	2,42	3,60	6,90	7,01	7,42	7,43	7,62
Área construida	0,16	0,18	0,91	0,96	1,40	1,53	1,61
Agricultura	2,34	3,09	5,66	5,77	6,30	6,30	6,46
Vegetación	51,16	69,59	83,51	83,58	83,87	83,88	83,95
Agua	0,22	0,23	0,26	0,26	0,28	0,28	0,29
Otra vegetación	0,01	0,01	0,05	0,05	0,07	0,07	0,07

Fuente: Elaboración propia con base la clasificación supervisada (método random forest) para marzo del año 2017.



	A. CAPTACIÓN1	A. CAPTACIÓN2	A.CAPTACIÓN 3	A.CAPTACIÓN 4	A.CAPTACIÓN 5	A.CAPTACIÓN 6	A.CAPTACIÓN 7
Pastizal	3,39	4,81	8,18	8,30	8,70	8,70	8,91
Área construida	0,06	0,09	0,93	1,00	1,50	1,65	1,77
Agricultura	0,45	0,68	2,87	2,99	3,60	3,60	3,69
Vegetación	52,41	71,00	85,09	85,11	85,22	85,22	85,28
Agua	0,10	0,11	0,16	0,17	0,22	0,22	0,24
Otra vegetación	0,01	0,01	0,06	0,06	0,10	0,10	0,11

Fuente: Elaboración propia con base la clasificación supervisada (método random forest) para marzo del año 2018.