

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



ELABORACIÓN DE UN MODELO MULTICRITERIO

CON BASE SIG PARA EL MANEJO INTEGRAL DE

RÍOS URBANOS UTILIZANDO VANTS Y

TECNOLOGÍA ESPECTRAL

Por

ING. DIANA LAURA MIRELES SORIA

**Como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRÍA EN
CIENCIAS con Orientación en Ingeniería Ambiental**

Noviembre, 2021

Elaboración de un modelo multicriterio con base SIG para el manejo integral de ríos urbanos utilizando VANTS y tecnología espectral.

Aprobación de la tesis

Directora de Tesis

Codirectora de Tesis

Vocal

Subdirector de Estudios de Posgrado



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

San Nicolás de los Garza, NL a 30 de noviembre 2021

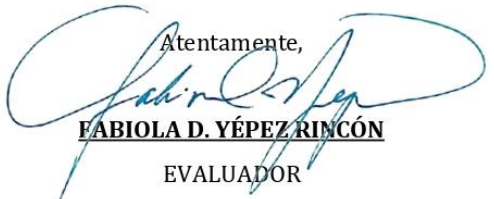
DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es “**ELABORACIÓN DE UN MODELO MULTICRITERIO CON BASE SIG PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RÍOS URBANOS UTILIZANDO VANTS Y TECNOLOGÍA ESPECTRAL**”, que presenta la **ING. DIANA LAURA MIRELES SORIA**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**. Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,



FABIOLA D. YÉPEZ RINCÓN
EVALUADOR



EDUCACIÓN DE CALIDAD PARA TRANSFORMAR Y
TRANSCENDER EN BENEFICIO DE LA HUMANIDAD

Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, C.P. 86455
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Tels 81 8329 4000 ext 7200 | 81 1442 4400
<http://fic.uanl.mx>



INSTITUTO DE GEOFISICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

DELEGACION DE COYOACAN

CODIGO 04510 MEXICO, D.F.

FECHA: 2021/11/25

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“ELABORACIÓN DE UN MODELO MULTICRITERIO CON BASE SIG PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RÍOS URBANOS UTILIZANDO VANTS Y TECNOLOGÍA ESPECTRAL”**, que presenta la **ING. DIANA LAURA MIRELES SORIA**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dra. Nelly Lucero Ramírez Serrato
Departamento de Recursos Naturales
Instituto de Geofísica, UNAM
Evaluador

Monterrey, N.L. a 9 de diciembre de 2021

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“ELABORACIÓN DE UN MODELO MULTICRITERIO CON BASE SIG PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RÍOS URBANOS UTILIZANDO VANTS Y TECNOLOGÍA ESPECTRAL”**, que presenta la ING. DIANA LAURA MIRELES SORIA, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRA EN CIENCIAS, del programa MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel CIENTÍFICO, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,



M. Sc. María Gabriela Ortiz Martínez

Evaluadora

gabriela.ortiz@tec.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE PROFESOR

NOMBRE: DIANA LAURA MIRELES SORIA

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO TESIS PI OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:

ELABORACIÓN DE UN MODELO MULTICRITERIO CON BASE EN INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, PARA EL MANEJO INTEGRAL DE RÍOS URBANOS, UTILIZANDO VEHÍCULOS AEREOS NO TRIPULADOS Y TECNOLOGÍA ESPECTRAL

RECOMENDACIONES ADICIONALES:

REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN EN LA TESIS IMPRESA

*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez
Asesor Profesional de Apoyo

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
Ciudad Universitaria, 17 de Noviembre de 2021



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P.P. 66455
Tels. (81) 14424400 ext. 4448 | 83294000 ext. 7216, 7234
correo electrónico: spi.fic@uanl.mx

Código: FOR-SPI-14; Revisión: 01; Página 1 de 1

Dedicatoria

A mis padres, Imelda Soria y Juan Fco. Mireles. Muchas gracias por acompañarme y apoyarme siempre en este camino. Alcanzar mis metas significa tenerlos a mi lado orientándome y facilitándome todo lo necesario.

A la Dra. Fabiola Yépez, por mostrarme que la adquisición de conocimiento nunca termina y no importa de dónde vienes sino lo que quieres llegar a lograr. Esta tesis está dedicada, además, a mujeres como ella, que día a día logran acortar la inequidad en la ciencia e ingeniería e impulsan a las nuevas generaciones a seguir innovando.

A aquellos grandes personajes del área ambiental que continuamente luchan por restaurar el equilibrio humanidad-naturaleza.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento a mí codirectora y amiga la Dra. Nelly Ramírez, quién me apoyó en el desarrollo de mi conocimiento en los SIG y además, me demostró que la geología puede ir mucho más allá.

Gracias a la Mtra. Gabriela, quien con sus palabras y comprensión me proporcionó confianza para finalizar este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para la realización de mis estudios y al PAICYT. Sin su aportación habría sido imposible concretar el proyecto y concluir mis estudios.

A mi familia del Departamento de Geohidrología del IIC quienes consolidaron mi enfoque en el agua. En especial al Ing. Valero, quien me introdujo en esta oportunidad y a la Ing. Lili, que me dio la confianza para aprovecharla.

A mi asesora, la Dra. Fabiola Yépez Rincón quién confió en una geóloga inexperta que sueña con una mejor calidad del agua en los ríos. Gracias por adoptarme en su departamento y confiar en mí para continuar su proyecto, por ser un ejemplo de tenacidad y liderazgo y de que la valentía te puede llevar muy lejos.

Al Departamento de Ambiental del IIC, por su apoyo en la recolección de datos sobre la calidad del agua y, en especial, al Departamento de Geomática quienes demuestran que con poco a veces se puede lograr demasiado y que en el trabajo si puede llegar a sentirse como en familia. Integrantes y exintegrantes, Roberto Huerta, Andrea Escobedo, Alejandro Barrón y Nelly Ramírez.

A mis amigos y compañeros de maestría; Fátima, Kevin, Reynaldo, Germán y Hugo. A mi amiga Vaquero a quién le ha tocado, en su mayoría, soportar el drama de terminar la maestría y de la vida en general.

A mis amigas fuera del ámbito académico, Eugenia, Lucía y Andrea quienes aún sin entender lo que hago me escuchan y han sido testigos de mi crecimiento. A mis amigas Dari, Gaby y Elisa quienes me demuestran que “future is female”.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Justificación de este estudio	17
1.3 Hipótesis	18
1.4 Objetivos	18
1.5 Marco Teórico	19
2 MÉTODO.....	32
2.1 Trabajo previo	32
2.2 Recursos	34
2.3 Trabajo de campo	35
2.4 Preprocesamiento de los datos	38
2.5 Validación de imágenes Sentinel mediante VANT	46
2.6 Insumos	47
3 RESULTADOS.....	59
3.1 Análisis de factores antrópicos.....	59
3.2 Análisis de factores ambientales	61
3.3 Uso del suelo	66
3.4 Análisis hidrológico	70
3.5 Modelo SIG	72
3.6 Discusión	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82

Recomendaciones.....	84
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Diagrama representativo de los servicios ambientales proporcionados por un río urbano. Ejemplo río Pesquería, Nuevo León. Elaboración propia.....	4
Figura 2. El espectro electromagnético. Obtenido de TYC GIS.....	9
Figura 3. Curva espectral característica de diferentes clases sobre la cobertura terrestre: agua, vegetación y suelo. Fuente: Adaptado de McCoy (2005).	12
Figura 4. Mapa de localización del río urbano Pesquería	20
Figura 5. Imágenes aéreas del área de estudio obtenidas con VANT. A. Área de inundación despejada con amplia vegetación. B. Asentamientos irregulares invadiendo el área de inundación con desechos sólidos en el cauce del río.	21
Figura 6. Fragmento del mapa digital de calidad del agua según DQO perteneciente al Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), CONAGUA. http://sina.conagua.gob.mx/	26
Figura 7. Relación de población y calidad del agua según datos de CONAGUA (2003-2012). Tomado de Ibarán Viniegra et al., 2017.	28
Figura 8. Relación entre el número de caudal tratado por PTAR y el porcentaje de sitios monitoreados contaminados. Tomado de Ibarán Viniegra et al., 2017.	29
Figura 9. Fase 1 del proyecto. En la parte superior se pueden observar los lugares prospectos para muestreo en color rojo. En la parte central la clasificación, y en la parte inferior imágenes aéreas del río Pesquería. Elaborado por el Departamento de Geomática, IIC.	33
Figura 10. A. Drone Inspire II. B. Drone Phantom 3. C. Cámara multispectral Parrot Sequoia.....	34
Figura 11 A. Plan de vuelo en plataforma DroneDeploy. B. Cámara Parrot Sequoia siendo asegurada al drone Inspire II por parte del equipo de Geomática.....	36
Figura 12. Diagrama de visualización de ángulos en un VANT.....	37
Figura 13. Fotografía tomada en campo durante la realización del levantamiento fotogramétrico. B. Muestras de agua recolectadas para el análisis de DQO.	38
Figura 14. Proceso fotogramétrico para la generación de ortomosaicos.	38

Figura 15. Ortomosaicos pertenecientes al sitio MEP01_C1, generados para cada una de las bandas disponibles proporcionadas por la cámara multiespectral.	40
Figura 16. Ortomosaicos multiespectral (superior) y RGB (inferior) pertenecientes al sitio de muestreo EP01 en el municipio de General Escobedo, N.L.	41
Figura 17. Diagrama de flujo de la aplicación del Método Multicriterio (MCDM) para el reconocimiento de áreas con muy baja calidad ambiental.	43
Figura 18. Tabla de atributos perteneciente a la capa de información en formato “shape” de los asentamientos reconocidos como irregulares para la zona del río Pesquería. Datos obtenidos por el INEGI, (2020).	48
Figura 19. Ortomosaico multiespectral perteneciente al vuelo EP01_2 (A) y su resultado del cálculo de NDVI (B).	54
Figura 20. Resultados de análisis de pendientes en el nivel regional, con escala 5m, a 1 m (A) y análisis de pendientes en el cauce (B).	57
Figura 21. Plano de la capa rasterizada para los asentamientos irregulares delimitados por el área de inundación del río Pesquería.	60
Figura 22. Resultado de la georreferenciación de los sitios identificados como descargas y las plantas de tratamiento localizadas con descarga al río en estudio.	61
Figura 23. Resultado de DQO total obtenidos del análisis de muestras obtenidas en el río Pesquería en los municipios de Escobedo, Monterrey, y García. Rango de calidad del agua utilizado por CONAGUA.	62
Figura 24. Gráfico de dispersión para los datos de GNDVI y NDVI obtenidos de la imagen multiespectral de SENTINEL 2.	64
Figura 25. Gráficas de dispersión para los resultados de NDVI (superior) y GNDVI (inferior) obtenidos con SENTINEL y VANT para AOI GP02 correspondiente a la fecha 8 de agosto de 2019.	65
Figura 26. Clasificación de uso de suelo mediante imagen Sentinel 2. Elaboración propia, fecha de imagen satelital: 19 de julio de 2019.	67
Figura 27. Resultado de orden hidrológico por el método de Strahler en la cuenca de estudio.	70
Figura 28. Resultados obtenidos de la clasificación de aportes hidrológicos al cauce del Río Pesquería	71

Figura 29. Método de trabajo para la elaboración de una herramienta multicriterio de caracterización ambiental para ríos urbanos.	73
Figura 30. Resultado de análisis multicriterio (MCDM) para el río Pesquería. Nivel de análisis de 2 km de “buffer” desde el cauce.....	75
Figura 31. Modelo multicriterio de calidad ambiental para los escurrimientos de la cuenca del río Pesquería.....	76
Figura 32. Mapa del MCDM hidrológico y de “buffer” de 2 km.	77

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Datos requeridos para la gestión de calidad del agua, utilizando sistemas de información geográfica. Traducido del libro Geographic Information Systems in Water Resources Engineering (Lynn E. Johnson, 2009).	7
Tabla 2. Resultados para calidad del agua por análisis de DQO en muestras de agua del Río Pesquería. Base de datos del SINA, 2019. (CONAGUA)	26
Tabla 3. Plantas de tratamiento (PTAR) que tienen como cuerpo receptor al Río Pesquería	30
Tabla 4. Tabla de Factores considerados para el Análisis Multicriterio de calidad de ríos urbanos.	43
Tabla 5. Descripción de la Escala de Calidad Ambiental (ECA) utilizada para valorizar cada uno de los factores del modelo multicriterio.	45
Tabla 6. Coordenadas geográficas UTM de los puntos de descarga identificados en el Río Pesquería	48
Tabla 7. Valor de calidad ambiental según el caudal de agua tratado por PTAR.....	49
Tabla 8. Clasificación de uso de suelo, con áreas resultantes para cada clase.....	50
Tabla 9. Tabla de intervalos de clase, para índices de vegetación.....	51
Tabla 10. Valores de reclasificación, para índices de vegetación.....	55
Tabla 11. Resultados de correlación entre los valores de NDVI y GNDVI para imágenes Sentinel y VANT por AI.	64
Tabla 12. Clasificación de uso de suelo para la cuenca del río Pesquería.	66
Tabla 13. Descripción de los sitios de muestreo en el río Pesquería y su clasificación de calidad del agua según los resultados del muestreo realizado por el IIC.....	68

NOMENCLATURA

AI	Área de Interés
AMM	Área Metropolitana de Monterrey
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CF	Coliformes Fecales
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DO	Oxígeno Disuelto
ECA	Escala de Calidad Ambiental
GREEN	Banda verde
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IIC	Instituto de Ingeniería Civil
Nm	Nanómetros
NDVI	Índice normalizado de vegetación
NIR	Banda de infrarrojo cercano
MCDM	Toma de decisiones por criterios múltiples
RED	Banda roja
REG	Banda de borde rojo
RGB	Combinación bandas roja, verde y azul (espectro visible)
SIG	Sistema de Información Geográfica
SINA	Sistema Nacional de Información del Agua
VANT	Vehículos aéreos no tripulados

Resumen

La urbanización es la fuerza dominante que da forma a la vida social, económica y ambiental en el siglo XXI. Una de las prioridades para los gobiernos locales es identificar los ecosistemas vulnerables, para que las ciudades sean inclusivas, seguras y resilientes (ODS 11). En América Latina, los ríos urbanos son ecosistemas vulnerables, afectados negativamente por la rápida urbanización. Además, la información geoespacial detallada de los ríos urbanos no se actualiza con frecuencia, por lo que los datos disponibles no reflejan los cambios que ocurren debido a los rápidos procesos de desarrollo urbano que afectan la calidad del agua, los sedimentos o la salud de la vegetación.

Esta investigación utiliza un análisis de decisiones multicriterio basado en GIS (GIS-MCDA) para la evaluación ambiental del río Pesquería, como una herramienta de decisión para facilitar estrategias enfocadas en la mitigación. El método desarrollado ha utilizado los datos de píxel a píxel, de factores socioeconómicos, ambientales, topográficos, e hidrológicos que afectan la salud ambiental de los ríos urbanos. Los datos del censo, la formación geológica o el tipo de suelo se obtuvieron a partir de información oficial; los índices de reflectancia y altura de la vegetación se obtuvieron mediante fotogrametría aérea con bandas de infrarrojo cercano y rojo; El análisis hidrológico y del terreno utilizó modelos digitales de elevación derivados de LIDAR; la cobertura del suelo y el análisis de vegetación se creó utilizando una imagen de SENTINEL 2; y los datos sobre la calidad del agua se obtuvieron de muestreos de campo obtenidos y analizados con análisis de laboratorio tradicionales de demanda química de oxígeno y validados también con datos oficiales. Los resultados implicaron la generación de mapas temáticos con intervalos de 1 (muy baja calidad) a 5 (muy alta calidad), según la escala de calidad ambiental propuesta.

Para el GIS-MCDA, los valores de cada mapa se convirtieron a la misma escala, cada criterio se ponderó en función de su importancia de acuerdo con la revisión de la bibliografía y el objetivo de esta investigación, y se agregaron mediante una combinación lineal. El resultado es un mapa que muestra el nivel de prioridad de mitigación o conservación a lo largo del río. Este mapa puede ofrecer información a los tomadores de decisiones en un tiempo relativamente corto y acelerar las acciones encaminadas a proteger la calidad de este importante ecosistema urbano.

1 INTRODUCCIÓN

Los ríos forman parte importante de la dinámica del agua en los ecosistemas de la Tierra. El agua, al fluir sobre la superficie, se convierte en un medio de transporte para las partículas que se encuentran libres en el entorno o, en su defecto, las que pueden ser removidas por actos erosivos. Dichas partículas se consideran contaminantes cuando pueden alterar las características organolépticas del agua, alterar severamente el ecosistema y con ello afectar a los humanos (Li et al., 2012; Taylor, K., Owens, P., 2009).

Debido al rápido crecimiento de la población y la industria, la urbanización se ha expandido desordenadamente, durante las últimas décadas, lo que conlleva a procesos degradantes que alteran el estado natural de los ríos urbanos (Castro-López et al., 2019a; Everard & Moggridge, 2012; Wilson et al., 2005). Un ejemplo de esto son los efluentes domésticos e industriales sin tratamiento que pueden encontrarse en el curso de los ríos, lo que aumenta los contaminantes, deteriorando la calidad del agua (Kar, Rathore, Champati ray, & Swain, 2016).

El desarrollo sostenible de las ciudades se ha vuelto un objetivo primordial para los líderes de nuestra sociedad, con el motivo de lograr un equilibrio ecológico y de mejorar la vida urbana. El diseño de herramientas que ayuden a alcanzar estos objetivos ha cobrado mayor importancia en la comunidad científica y de ingeniería. (Raven, H., M., & F.H, 2011)

Las iniciativas para el manejo de ecosistemas fluviales requieren de la identificación, estimación y evaluación de los contaminantes que afectan la calidad del agua (Ferreira et al., 2018). El deterioro progresivo de la calidad de este recurso global y prioritario impulsa la necesidad de crear técnicas innovadoras para predecir la conducta de los indicadores de la contaminación del agua (Castro et al., 2014; Veról et al., 2019).

El uso de herramientas geoespaciales facilita el proceso de toma de decisiones, especialmente en lo que se refiere a temas relacionados con la planificación y el manejo de ecosistemas (Kar et al., 2016; Udias et al., 2016; Veról et al., 2019; Y. Wang et al.,

2019). Estas herramientas se definen como un conjunto de tecnologías destinadas a capturar, almacenar, manipular y editar datos georreferenciados. Con el empleo de sensores remotos, como los vehículos aéreos no tripulados (VANT), la recopilación de dichos datos se torna más eficiente y cada vez de mayor resolución (Messinger & Silman, 2016; Z. Wang et al., 2019).

El objetivo de este trabajo será la evaluación ambiental del río Pesquería, utilizando sensores remotos y la generación de un modelo multicriterio con base en sistemas de información geográfica (SIG). Se busca categorizar los factores ambientales del sitio mediante parámetros de calidad ambiental, y de esta manera lograr una priorización de las áreas para remediación.

Primero se abordará el problema de la contaminación de los ríos urbanos, las herramientas que se han implementado para la evaluación ambiental de estos ecosistemas, así como los estudios previos que se han realizado para la caracterización y monitoreo de los cuerpos de agua del país.

Se generará y correrá el modelo SIG para la comprobación de la hipótesis “la aplicación de un modelo multicriterio para la detección y evaluación de la calidad ambiental del río Pesquería, mediante imágenes multiespectrales y su validación con VANT permitirá la generación de una herramienta actualizable que coadyuve a la gestión ambiental de los ríos urbanos...

Para la creación del modelo se recopiló la mayor cantidad de insumos disponibles sobre el área de estudio, considerando distintas escalas de información y cumpliendo el método planeado para la estandarización de los datos en formato georreferenciado.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Ríos urbanos

Los ríos forman parte del ciclo hidrológico en nuestro planeta. Cuando llueve, parte del agua penetra en el suelo y parte se acumula, formando arroyos y ríos que eventualmente

desembocan en el mar. La cantidad de agua en los ríos y en los lagos siempre cambia debido a las entradas y salidas. Las entradas a estos cuerpos de agua provendrán de precipitaciones, escorrentías terrestres, filtraciones de aguas subterráneas y afluentes tributarios. Las salidas de los lagos y los ríos incluyen la evaporación, el movimiento de agua hacia las aguas subterráneas y la extracción para consumo humano.

Los ríos forman parte importante dentro de los sistemas de aprovechamiento del recurso hídrico (Wilson et al., 2005; Zhang et al., 2008). No toda el agua que fluye por los ríos regresa al ciclo de inmediato, puesto que la población humana, hace gran uso del agua superficial para satisfacer sus necesidades.

En los ambientes urbanos, los ríos son de gran importancia, no sólo por sus funciones como ecosistema, sino también por las interacciones que se generan entre este sistema y la sociedad (Pereira et al., 2018). Los ríos que han quedado dentro de una ciudad son considerados “ríos urbanos”, y éstos, además, tienen grandes retos asociados con el crecimiento de la población y con el uso del agua (Hernández-Tapia, 2017) (Figura 1).

Estos sistemas acuáticos proveen de servicios ambientales múltiples, incluyendo el control de inundaciones, almacenamiento de agua, funciones erosivas, control y estabilización de microclimas, provisión de alimentos, dilución de desechos y provisión de servicios estéticos y recreativos, entre muchos otros (CONABIO, 2021); por lo tanto, representan una fuente de abastecimiento para las necesidades de la comunidad, empero, un punto de descarga de desechos. Estos servicios, de no ser gestionados de manera adecuada, pueden tener consecuencias negativas para el ambiente o para la salud y la calidad de vida de la población (Beißler & Hack, 2019; Everard & Moggridge, 2012).

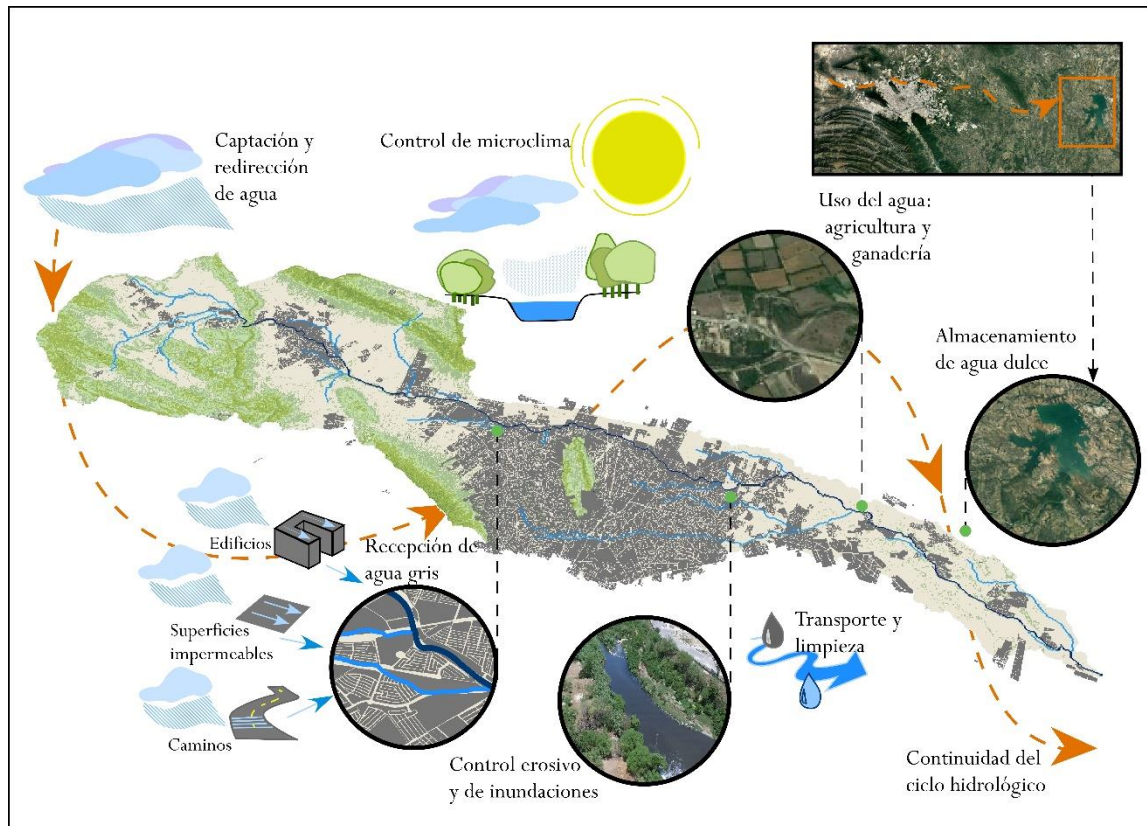


Figura 1. Diagrama representativo de los servicios ambientales proporcionados por un río urbano. Ejemplo río Pesquería, Nuevo León. Elaboración propia.

Hernández-Tapia (2017) menciona que un río urbano no debería ser sinónimo de “una cloaca a cielo abierto”, considerando que, entre otras amenazas al ecosistema, las descargas residuales fuera de norma han derivado en una crisis ambiental. En este sentido, según lo demostrado en situaciones internacionales, el primer paso hacia la remediación consiste en sanear los ríos mediante el control y el tratamiento de estos contaminantes (Zang et al., 2012).

1.1.1.1 Contaminación en los ríos urbanos

Cuando se habla de un río urbano, es necesario delimitar el medio desde una perspectiva tanto hidrológica como social, ya que las condiciones en las que se encuentre dependerán de la urbanización de las microcuencas y los contaminantes que generen (Ferreira et al., 2018). Por ejemplo, las aguas residuales de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos y, en general, de cualquier otro uso, son una fuente importante de contaminación de agua en los ríos (NOM-001-ECOL-1996).

Para los ríos urbanos se plantea la presencia de contaminantes orgánicos, inorgánicos o químicos. Los contaminantes orgánicos, como las bacterias coliformes fecales, los nitratos, los fosfatos, los inorgánicos, como en el caso de los metales pesados y otros químicos son también catalogados como contaminantes de fuentes puntuales y contaminantes emergentes, provenientes en aguas residuales (Michl & Graizbord, 2002).

Además de los contaminantes comunes en el agua, la degradación ambiental de los ríos urbanos se manifiesta con la transformación de los ecosistemas (el cambio de uso del suelo), la sobreexplotación del agua, la alteración de los flujos de agua por la retención en presas, bordos y canales, y la introducción accidental o deliberada de especies exóticas invasoras que causan la pérdida de la biodiversidad acuática epicontinental (Lira-Noriega et al., 2015).

Aunado a las descargas puntuales de agua residual, los ríos urbanos son comúnmente utilizados como tiraderos clandestinos de residuos sólidos urbanos (Somvanshi.S et al., 2012), ocasionando contaminación y reduciendo la disponibilidad de agua limpia. Existen, además, problemas de asentamientos humanos irregulares, cuyos pobladores explotan los recursos acentuando aún más la degradación del espacio (Esse et al., 2019; Malik et al., 2020), exponiéndose a problemas de salud humana, y pérdida de bienes ante una inundación.

Actualmente, con el método tradicional para la determinación de la calidad del agua, se realizan distintos análisis químicos y físico-químicos, como la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que determina la cantidad de oxígeno necesario para oxidar a la materia orgánica de un desecho, transformándola en CO₂ y agua, también la determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y los Coliformes Fecales (CF) (Ramírez-López et al., 2011).

El DQO es la prueba analítica determinante de la cantidad de materia orgánica degradable mediante degradantes químicos en muestras de agua. Las anomalías en los resultados de DQO obedecen al vertido de aguas residuales, tanto municipales como no municipales, y a un aumento en la concentración de éstos significa una reducción en el contenido de

oxígeno disuelto en el agua, afectando a ecosistemas acuáticos y a los organismos que habitan en ellos.

El método tradicional para la detección de contaminantes se centra en el trabajo de campo realizando muestreos que implican costos elevados y largos espacios de tiempo; aunque el método es efectivo en cuestión de investigación puntual de escala local, resulta ineficiente para la generación de datos cuando se requiere una interpretación del problema en el nivel de cuenca.

Uno de los principales retos para los organismos gestores del agua para dar seguimiento al monitoreo y control de la contaminación de los ríos urbanos es que, aunque se ha hecho un esfuerzo, no se han podido establecer herramientas de monitoreo continuo para las fuentes de dichos contaminantes (Zingaro et al., 2019).

1.1.1.2 Manejo Integral De Ríos Urbanos.

Debido al aumento demográfico de las ciudades, se vuelve más relevante la importancia de integrar a los ríos urbanos dentro de la planificación urbana sostenible, salvaguardando sus procesos bioquímicos, que garanticen los servicios ambientales que brindan sus espacios naturales y el recurso hídrico.

Las técnicas de evaluación para la determinación de los planes y los proyectos para el manejo integral de los ríos urbanos cuentan con la opinión de expertos y los valores óptimos de los factores más deseables. Entre los factores más destacados para el manejo de los ríos urbanos se encuentran la calidad del agua, los riesgos hidrológicos, la calidad de la vegetación y factores socioambientales (Balta & Yenil, 2019; Neachell, 2014; Zhang et al., 2008).

En el tema de la calidad del agua se requiere una base de datos multifactoriales inter y transdisciplinaria (ver Tabla 1), que proporcione la suficiente información sobre el área de estudio para realizar la evaluación completa de una cuenca (Johnson, Lynn E., 2009; Ritchie, J.C. et al., 2003).

Tabla 1. Datos requeridos para la gestión de calidad del agua, utilizando sistemas de información geográfica. Traducido del libro Geographic Information Systems in Water Resources Engineering (Lynn E. Johnson, 2009).

Información necesaria para la Gestión de la Calidad del Agua			
Características de la cuenca	Fuentes de contaminación	Datos ambientales y ecológicos	Datos Administrativos
Topografía y pendientes terrestres	Ubicaciones de fuentes puntuales y descargas y cargas asociadas	Datos climáticos y meteorológicos	Límites de jurisdicción y administrativos
Límites de cuencas y subcuencas hidrográficas	Uso/ cobertura de la tierra	Estaciones de monitoreo de la calidad del agua: ubicaciones y registros de series de tiempo	Estándares de calidad del agua
Red de drenaje de arroyos o pluviales	Carreteras y calles	Datos de calidad del agua (temperatura, TDS, SS, DQO, DO, N, P)	Registros de cumplimiento
Segmentos de río	Sitios de construcción	Evaluaciones y datos ecológicos	Permisos para descargas de contaminantes
Infraestructura hidráulica	Sitios de eliminación de desechos sólidos	Abastecimiento de agua potable	Propiedad predial
Velocidades de flujo (por temporada)	Zonas impermeables urbanas	Playas y sitios para nadar.	
Impermeabilidad de cada subcuenca, incluida la parte directamente conectada			
Calles, bordillos y cunetas y canaletas de entrada.			
Uso de la tierra y cobertura vegetal, incluidos los patrones de cultivo			
Suelos y características (composición, textura, permeabilidad, erosionabilidad)			
Datos geológicos			
Almacenamiento en superficie (depresiones)			
Imágenes digitales			

Es necesaria la incorporación del río urbano en la conformación estructural de las ciudades con la finalidad de fortalecer la resiliencia integral del río - ciudad (Hernández-Tapia, 2017). Para ello se requiere la comprensión del comportamiento hidrológico, la calidad del agua y, en general, el ecosistema fluvial conveniente, tanto para el entorno natural, como para la urbanización (Morandi, Piegay, Lamouroux, & Vaudor, 2014).

Con este propósito, en el mundo se han creado políticas públicas que incentivan la creación de programas ambientales para el estudio de estos ecosistemas. Algunos conceptos como la fragilidad ambiental y la vulnerabilidad ecológica, entre otros, se utilizan como herramientas de caracterización de los ecosistemas y permiten proponer una mejor planeación de los asentamientos humanos.

En México se tiene como instrumento de gestión, dentro de la política pública, el Ordenamiento Ecológico del Territorio, cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de éstos. Este instrumento se lleva a cabo a través de los programas de ordenamiento ecológico en los cuatros niveles: (i) general, (ii) regional, (iii) local y (iv) marino.

Estos programas de ordenamiento requieren la caracterización y el diagnóstico de los ecosistemas, describiendo sus atributos físicos, bióticos, socioeconómicos, y sus condiciones ambientales, además de las tecnologías utilizadas por los habitantes del área; indicando el grado de conservación y/o deterioro del ambiente (LGEEPA, 2021).

1.1.2 Sensores remotos

Los sensores remotos hacen referencia, generalmente, a la recolección de datos de un objeto a distancia, a través de señales propagadas como la radiación electromagnética y transforman los datos en información digital para su posterior análisis e interpretación. Estos sensores miden la radiancia y la reflectancia que es la relación entre la energía total reflejada y el total de energía transmitida. La calidad de la información obtenida dependerá del tipo de sensor remoto utilizado, y se refiere al tipo de resolución, p.e la resolución espacial, que es el área representada por cada píxel en la imagen producto, la resolución espectral, el número de bandas que componen la imagen captada, la resolución radiométrica, que es el número de niveles digitales utilizados para la representación de la imagen, y la resolución temporal, que indica la frecuencia con la que se obtiene la información. Algunos de los sensores remotos más reconocidos son los satélites, LIDAR y los drones o VANT.

La tecnología satelital, aunque resulta de gran ayuda para la accesibilidad de información, requiere de un exhaustivo preprocesamiento, al presentar en repetidas ocasiones problemas en la resolución de imágenes debido a condiciones ambientales, ya que son susceptibles a la aparición de nubosidad (Montzka et al., 2008), optando así por la omisión de algunas imágenes o la adaptación de la información. Este tipo de problemas se podría evitar con el uso de un sensor remoto que permita obtener resultados, independientemente

de las condiciones climáticas p.e. RADAR, o bien, realizar tomas más cercanas a la superficie (Burud et al., 2017; Zang et al., 2012).

1.1.3 Regiones espectrales

Los métodos espectrales se basan en la respuesta de la radiancia y la reflectancia ante un objeto específico, donde el primero es la energía que emite el sensor en una dirección dada, y el segundo es la relación existente entre la energía reflejada por un objeto y la que incide en el mismo, donde el color del objeto está determinado por la longitud de onda que se emite (Myneni et al., 1995).

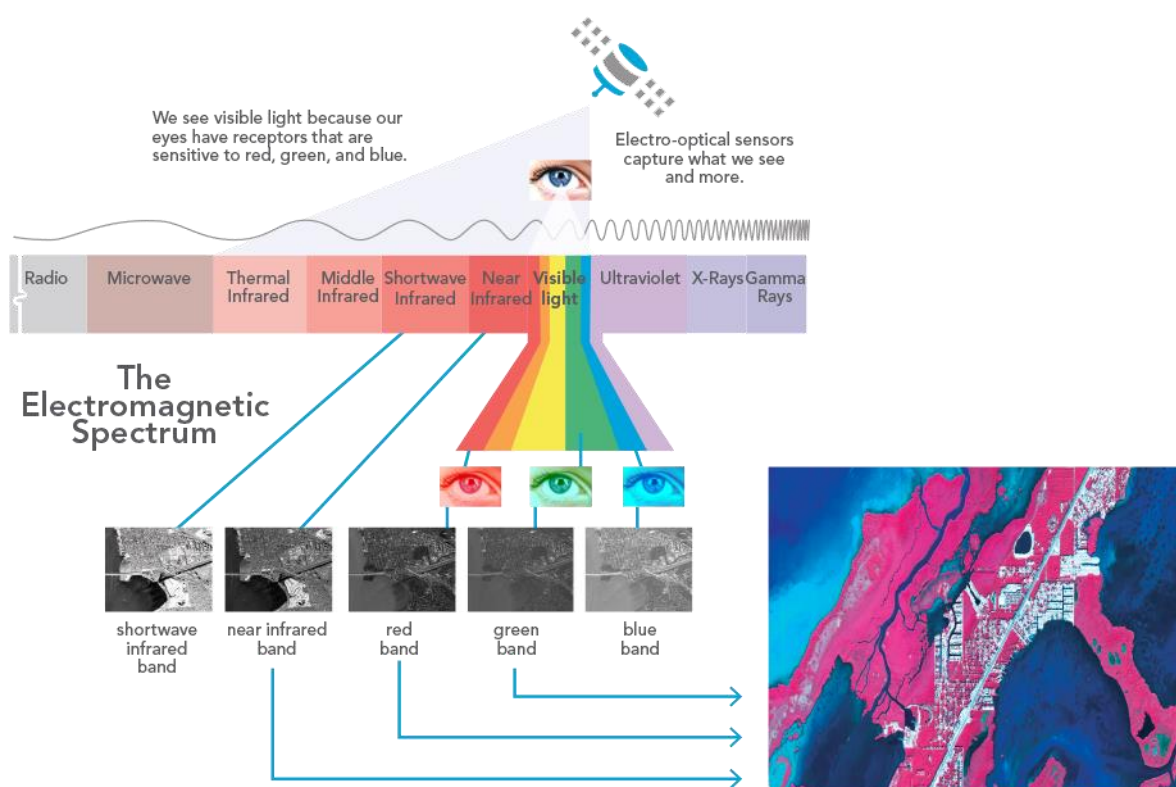


Figura 2. El espectro electromagnético. Obtenido de TYC GIS.

La aplicación de tecnología espectral en sensores remotos se utiliza para la clasificación de las imágenes espectrales, de acuerdo con su resolución espectral (Figura 2). La espectroscopia realizada con satélites y aeronaves trata básicamente de medir la interacción entre la materia y la radiación electromagnética, para la identificación de las propiedades y los procesos que suceden en la superficie de la Tierra (Adam et al., 2010; Ustin et al., 2004).

Los sensores multiespectrales captan información específica del espectro electromagnético por medio de múltiples bandas dentro del espectro visible RGB y la zona de borde rojo (RED EDGE) e infrarrojo cercano (NIR). Esta información se almacena como una imagen, que se compone de pequeños cuadros llamados píxeles, los cuales almacenan la información en un formato tabulado.

Se han realizado múltiples investigaciones, utilizando esta tecnología, en distintas áreas de la ciencia. Entre las técnicas de uso de información multiespectral se encuentran los índices espectrales, que están compuestos por operaciones algebraicas efectuadas sobre los valores numéricos de los píxeles, utilizando dos o más bandas (Muños Aguayo, 2013).

Monitorear y estimar los parámetros de calidad del agua, óptica y no ópticamente activos a gran escala, mediante la explotación de datos de detección remota es esencial para proporcionar un tratamiento dirigido a las cuencas hidrográficas (Sharaf El Din, E. & Zhang, Y. 2017). Existen algunos parámetros que sin ser tal cual contaminantes, su presencia o aumento en cantidad indican la calidad del agua (Liu et al., 2020; Ritchie et al., 2003). El análisis comparativo de índices de reflectancia con imágenes multiespectrales puede proporcionar también información sobre geomorfología y es posible determinar el índice de conectividad entre sedimentos para la gestión de ecosistemas (Estrany, J. et al., 2019).

Estudios recientes tratan de demostrar las asociaciones espaciales entre el NDVI y los factores ambientales e identificar los factores dominantes a través de métodos geográficos (Yuan et al., 2019; Berry & Mackey, 2018). Es por eso por lo que varios modelos entran en el escenario para minimizar la posibilidad de error (Malik et al., 2020).

1.1.4 Vehículos aéreos no tripulados

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) constituyen una opción tecnológica importante en el contexto de diversas aplicaciones de ingeniería (Nong et al., 2011), en las cuales, por cuestiones de logística o de capacidad técnica, se debe implementar una inspección a distancia (Vera-rozo, 2016). En el área ambiental representa una herramienta de mucha utilidad, debido a que proporciona información actualizada a través de imágenes

de alta resolución, a un bajo costo (De Luca et al., 2019; Nong et al., 2011; Z. Wang et al., 2019). Así mismo, representa una ventaja debido a la reducción en la ventana de tiempo entre el muestreo in-situ y la toma de fotografías por medio del sensor remoto, distando de la método aplicada utilizando imágenes satelitales (Estrany et al., 2019; Messinger & Silman, 2016; Su, 2017).

La implementación de sensores remotos en conjunto con el muestreo in-situ es aplicado en el monitoreo de ecosistemas hídricos en diversas partes del mundo (Kinthada, 2014; López-Vicente & Ben-Salem, 2019; Veról et al., 2019). Dependiendo del propósito de investigación, los VANTs están equipados con varios complementos, desde cámaras de baja o alta resolución, radares, GPS y hasta sensores que pueden ser térmicos o multiespectrales (Vega, Ruíz, & Garro, 2017).

1.1.5 Clasificación espectral

Dentro de los métodos existentes para la clasificación de imágenes multiespectrales (p.e. las imágenes satelitales) destaca la clasificación supervisada y la clasificación no supervisada. En ambos procesamientos se busca obtener diversas clases acorde a las propiedades espectrales de los objetos, esto es porque, cada elemento o grupo de objetos de una misma clase refleja la luz a distinta longitud de onda (Ingado, 2014) teniendo un comportamiento singular a lo largo del espectro. A esto se le conoce como “Firma espectral”. El ejemplo más claro de esto es la vegetación verde, pues las hojas de los árboles absorben la luz emitida en el nivel espectral del rojo, pero reflejan en gran medida la luz perteneciente a la región del infrarrojo, lo que permite agrupar todos los píxeles correspondientes a la clase de vegetación a partir de su información espectral (Adam et al., 2010; Saha et al., 2018). Algunos ejemplos de firmas espectrales se muestran en la Figura 3.

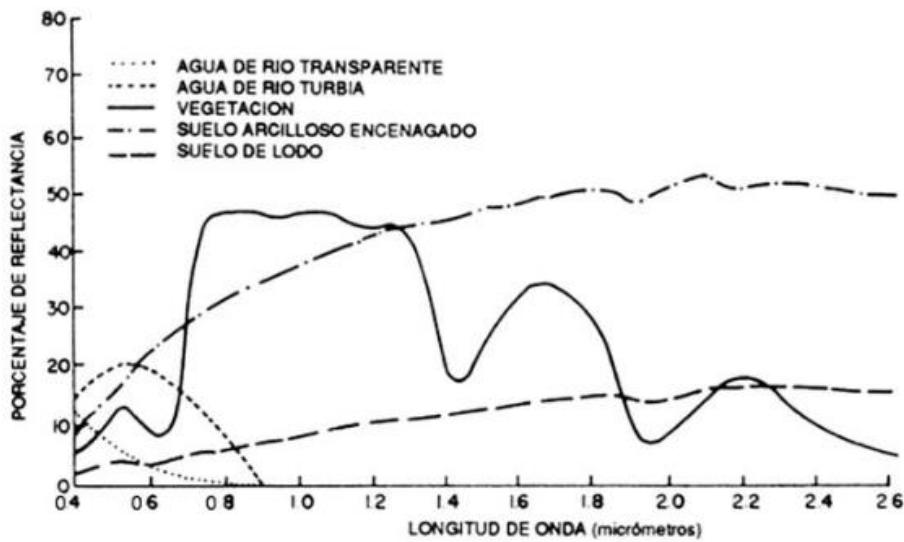


Figura 3. Curva espectral característica de diferentes clases sobre la cobertura terrestre: agua, vegetación y suelo.
Fuente: Adaptado de McCoy (2005).

Las clasificaciones agrupan estos intervalos de respuesta, determinándose un “cluster” que ayuda a distinguir en la imagen un grupo de píxeles con repuestas espectrales similares. En la clasificación supervisada se obtiene un resultado mayormente controlado por el usuario ya que, en el mismo, se hacen selecciones de píxeles que representan patrones reconocibles o identificables con el uso de otras fuentes y se les asigna una clase de manera que se generen firmas espectrales que entrenen al software para identificar píxeles de características similares (Melgani, Al Hashemy & Taha, 2000).

Mientras que en la clasificación no supervisada el cómputo se realiza utilizando de manera automática las estadísticas del píxel, encontrando los niveles diferenciales con desviaciones estándar y agrupando los clústeres en clases. Ambos tipos de clasificación son utilizados y generalmente se usan en conjunto. Para el mapeo de la cobertura terrestre se utilizan imágenes de satélite y hay varios algoritmos de clasificación como: cambio medio a gran escala (De Luca et al., 2019), máxima similitud y vectores de soporte (Otukey & Blaschke, 2010), etc.

El índice de vegetación es uno de los métodos de clasificación que se utilizan ampliamente para detectar cambios en la cobertura y el uso del suelo (Aburas et al., 2015; Malik et al., 2020) éste puede ser definido como un parámetro calculado a partir de los valores de la

reflectancia a distintas longitudes de onda, y que es particularmente sensible a la cubierta vegetal (Muñoz, 2013; Myneni et al., 1995). Las fórmulas utilizadas están diseñadas para la detección de condiciones específicas de vegetación y humedad, las cuales emplean las bandas de NIR, GREEN, RED y RED EDGE.

Estos índices permiten generar imágenes que pueden estimar el contenido de clorofila y el estado del nitrógeno, de acuerdo con las condiciones presentes en la vegetación, al momento de la toma. Estas características se utilizan para la identificación de vegetación riparia, que a menudo es correlacionada con la eliminación de contaminantes (Esse et al., 2019), la regulación de procesos bioquímicos (Ustin et al., 2004), por lo cual la vegetación riparia es un ecosistema fundamental para la conservación de los ríos (Castro-López et al., 2019b).

1.1.6 Modelos SIG

En los últimos años se ha incrementado el interés por la preservación de los sistemas ambientales y la restauración de ecosistemas degradados, así como reconocer la dinámica de los ríos y su comportamiento morfológico (Ana Costa Marques Machado, Aline Pires Veról, Bruna Peres Battemarco, 2020; Veról et al., 2019).

Los métodos de toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM, por sus siglas en inglés) proporciona a las instancias decisorias diferentes coeficientes de ponderación, mediante una combinación de procedimientos, técnicas y algoritmos para diseñar y estructurar los problemas de decisión y evaluar decisiones alternativas. A la par, con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), podemos utilizar el entorno SIG para manipular, almacenar, gestionar, analizar y visualizar datos espaciales (Malczewski, 2006; Tkach & Simonovic, 1997).

De acuerdo con la bibliografía, en el caso de planes de manejo sólo es posible aplicarlos de manera efectiva cuando se tiene una caracterización adecuada de los problemas presentes y esto es posible gracias a que con el uso de herramientas de clasificación, se logra un entendimiento de la situación presente en la cuenca y una predicción de acciones en el entorno (Beißler & Hack, 2019; Haase et al., 2014; Schwarz et al., 2017).

Los datos obtenidos de la percepción remota permiten mantener información actualizada para una mejor gestión de los ecosistemas de nuestro planeta. En general, el estudio de evaluación ecológica involucra múltiples criterios, variables y análisis espaciales (Beißler & Hack, 2019; Jozi et al., 2010). A través de los datos de percepción remota hoy en día se pueden crear modelos para el estudio de los ecosistemas del planeta, desde áreas naturales (De Luca et al., 2019; Zelentsov et al., 2020), hasta zonas de riesgo en áreas urbanas (Esse et al., 2019; Ramirez, 2019; Y. Wang et al., 2019). Se han realizado modelos multicriterio basados en los SIG para la zonificar la degradación de los ríos, considerando las condiciones de la planicie de inundación del río y la conectividad de este (de Oliveira Campos et al., 2020; Neachell, 2014).

La aplicación de los MCDM para la toma de decisiones ambientales se orienta en dos direcciones, una denominada empírica que pretende explicar y predecir el comportamiento lógico de los agentes decisores y la otra llamada normativa que define la racionalidad de sus decisiones, para posteriormente realizar operaciones lógicas que permitan deducir un comportamiento óptimo del sistema. Para la aplicación de un método multicriterio se requieren atributos, objetivos, niveles de aspiración y criterios (Garmendia, 2005).

Algunos autores, como Veról, Battemarco, & Merlo, (2019) consideran además de la conectividad, el riesgo hidráulico y el estado general de la cuenca, tomando en cuenta desde factores naturales como la permeabilidad, hasta condiciones de sanidad. Así mismo algunos indicadores de la calidad del agua, tanto biológicos como químicos Marques, Veról, & Peres, (2020). Oliveira Campo (2020) utilizan el concepto de indicadores de sostenibilidad como criterio para apoyar la intervención en la gestión de los flujos de agua en áreas urbanas. Los indicadores están relacionados con los tres pilares de la sostenibilidad: las dimensiones económica, medioambiental y social. Su método resalta el diagnóstico de la geomorfología del cauce.

Los estudios en el tema de monitoreo ecológico de ríos urbanos consideran la importancia de trabajar a escala de cuencas, para minimizar los efectos de la urbanización en el ciclo del agua, ofreciendo condiciones de apoyo al enfoque de restauración de ríos en el entorno urbano (Neachell, 2014; Rinaldi et al., 2016). El uso del suelo en las zonas de inundación

y la presencia de estructuras en el curso del río están directamente relacionados con la calidad del sistema fluvial (Rogan & Chen, 2004; Zhang et al., 2008). Por ello se propone caracterizar la cuenca determinando la cobertura del suelo y sus propiedades, basándose en datos de teledetección.

Se plantea el uso de imágenes de ultra alta resolución proporcionadas por VANT, además de imágenes satelitales multiespectrales del satélite Sentinel 2 para la calibración del modelo. Las imágenes satelitales se encuentran disponibles de manera gratuita y con un preprocesamiento atmosférico ya establecido, además de una resolución temporal alta de 5 días, por lo que resultan convenientes, al adaptar un método para el mapeo de sitios de gran vulnerabilidad ambiental. Esto abre una nueva oportunidad en el desarrollo de gestión ambiental para áreas específicas, haciendo una revisión más exhaustiva de las condiciones de los ríos urbanos.

Toda la información mencionada podrá ser utilizada para la elaboración de una herramienta con base SIG que sea útil para la zonificación de problemas de vulnerabilidad ecológica y asista en la determinación de zonas prioritarias (menor calidad ambiental) para la implementación de medidas de mitigación ambiental. En dicha herramienta los parámetros definidos se califican en función de su jerarquía en las tendencias de contaminación ambiental para ríos urbanos (Abdollahi et al., 2020; Esse et al., 2019; Rinaldi et al., 2016), de manera que para cada capa de información se obtienen ponderaciones que muestran la importancia, y su impacto en la calidad del ecosistema con respecto a las demás capas de información. Finalmente, para determinar las zonas con menor calidad ambiental se utiliza una ecuación con la cual se realiza una sumatoria ponderada de cada una de las capas de información utilizando el valor del píxel previamente definido.

Uno de los métodos más comunes para modelar espacialmente la vulnerabilidad ambiental es la suma lineal ponderada de los parámetros que intervienen en la calidad del ecosistema (Koleff et al., 2015). Sin embargo, existe la dificultad de determinar la probabilidad de ocurrencia de áreas contaminadas, debido a la heterogeneidad de la información generada a partir del uso de sensores ópticos, afectados por las condiciones atmosféricas lo que ocasiona que existan vacíos en las temporadas de muestreo, complicando los resultados

del modelo, ya que dependen directamente de la información que se ingresa; por lo tanto, la falta de información o detalle (temporal o espacial) en los insumos de entrada representan una desventaja en el mapa resultante.

El modelo SIG presentado en este documento es una combinación del procedimiento planteado por de Oliveira Campos et al., (2020); Veról et al., (2019) y anteriormente en Yilmaz & Harmancioglu, (2010), en donde los parámetros con mayor influencia son recategorizados para resolverse en una suma lineal ponderada. Así mismo, el método propuesto por Udias et al., 2016 y Y. Wang et al., (2019), en donde se utiliza la superposición de modelos cartográficos, asignando índices para algunos factores específicos. Los modelos SIG se desarrollan tomando en cuenta factores ambientales como la forma del relieve, la hidrología, información de uso de suelo y factores antropogénicos.

1.1.6.1 Valoración de los criterios

Hay dos enfoques principales cuando se trata de ponderación: ponderaciones subjetivas (definidas por el usuario) y ponderaciones objetivas (se definen por la naturaleza de los datos). Hasta la fecha, la gran mayoría de los estudios han utilizado ponderaciones definidas por el usuario basado en una serie de técnicas diferentes. Existen varios métodos definidos por el usuario, como la clasificación, la calificación o la comparación por pares, y éstos se utilizan comúnmente en cuestiones de SIG-MCDM (Malczewski, 2006). Estos métodos son excelentes, ya que incorporan las preferencias de los responsables de la toma de decisiones y permiten representarlas en los mapas de la solución. Sin embargo, los datos revelan que las preferencias de los tomadores de decisiones no siempre son concluyentes y pueden dar lugar a ponderaciones inconsistentes. A medida que los problemas espaciales se vuelven más complejos, los tomadores de decisiones cuentan con una mayor cantidad de variables, y por lo tanto llegar a un acuerdo en la ponderación, se vuelve cada vez más difícil.

Una de los métodos adoptados por los expertos en el tema para la ponderación de criterios es a través de mesas de trabajo, en las que, en base a sus propias experiencias, conocimiento y percepción del problema, se llega a un consenso sobre la importancia de cada factor. Esta asignación puede realizarse mediante una técnica de obtención de

preferencias como el proceso de jerarquía analítica. Sin embargo, los involucrados en el proceso de decisión suelen tener diferentes opiniones y es común que se presenten conflictos para llegar a un acuerdo sobre la importancia relativa de los criterios (Yilmaz & Harmancioglu, 2010).

1.2 Justificación de este estudio

Las zonas urbanas se volverán imprescindibles para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por las Naciones Unidas en su Agenda 2030. Los gobiernos locales deben identificar los ecosistemas vulnerables para que las ciudades sean inclusivas, seguras y resilientes (ODS 11). En la América Latina, los ríos urbanos son ecosistemas vulnerables, afectados negativamente por la rápida urbanización. Además, la información geoespacial detallada de los ríos urbanos no se actualiza con frecuencia, por lo que los datos disponibles no reflejan los cambios que ocurren debido a los rápidos procesos de desarrollo urbano que afectan la calidad del agua, los sedimentos o la salud de la vegetación. Esta investigación utiliza un análisis de decisiones multicriterio basado en GIS (GIS-MCDA) para la evaluación ambiental del río Pesquería, como una herramienta de decisión para facilitar estrategias enfocadas en la mitigación.

La construcción de un modelo multicriterio para la caracterización y la evaluación del río Pesquería se verá beneficiada mediante la implementación de tecnología innovadora como son los VANT y la tecnología multiespectral, como una herramienta para la evaluación de ríos urbanos. Se plantea el mejoramiento de la detección y el mapeo de los sitios contaminados, disminuyendo el tiempo, los costos y cubriendo áreas más extensas sin la exposición del personal humano a los peligros que representan zonas potencialmente contaminadas. Además, se espera que con el método planteado sea posible identificar las áreas prioritarias para la mitigación de vulnerabilidad ambiental, con opción a una constante actualización de la herramienta que permita un monitoreo de avances en la gestión.

1.3 Hipótesis

La aplicación de un modelo multicriterio para la detección y evaluación de la calidad ambiental del río Pesquería, mediante imágenes multiespectrales y su validación con VANT, permitirá la generación de una herramienta actualizable que coadyuve a la gestión ambiental de los ríos urbanos. Esto eficientizará el manejo integral de la cuenca, priorizando las áreas viables para remediación.

1.4 Objetivos

Generar un modelo multicriterio con base SIG, que permita la evaluación ambiental en el río Pesquería, por medio del análisis de factores ambientales presentes, categorizándolos por parámetros de calidad ambiental, de acuerdo con las normatividades vigentes, que priorice las áreas para remediación, utilizando sensores remotos.

- Caracterizar la subcuenca del río Pesquería, mediante imágenes multiespectrales de alta resolución (Sentinel II) y fotogrametría aérea multiespectral con VANT para sitios de interés sobre el área urbanizada.
- Determinar la calidad del agua por análisis de DQO, de acuerdo con los resultados de muestreo de campo y los reportados por el SINA (CONAGUA).
- Evaluar la calidad de la vegetación riparia, mediante análisis espacial de índices espectrales que permitan conocer características de relevancia ambiental, como NDVI y GNDVI.
- Compilar información para alimentar una base de datos SIG de los parámetros ambientales, con información antecedente y la generada para este proyecto, que facilite el reconocimiento de los problemas a lo largo de las diferentes secciones en la zona urbanizada del río Pesquería.

- Valorizar los factores socioambientales utilizando parámetros de calidad ambiental, los cuales serán vertidos en el modelo multicriterio, para la priorización de los sitios que requieran acciones de mitigación o remediación.

1.5 Marco Teórico

1.5.1 Área de estudio

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) cuenta con una población de 5,341,171 en el 2020, representado un 92.33% de la población total del Estado, la cual es de 5,784,442 (INEGI, 2020). Ésta es una de las zonas metropolitanas con mayor tasa de expansión en el país, ocasionando el asentamiento de familias en las márgenes de ríos o incluso la construcción de viviendas dentro del cauce, donde hay un carecimiento de atención hacia los servicios básicos de sanidad y recolección de residuos.

La historia local ha demostrado que los ríos que pertenecen al AMM no cuentan con las características para cumplir otra función más que el drenaje de agua. El aumento en su afluente, al presentarse la temporada de lluvias y huracanes, incrementa su vulnerabilidad y, debido al agresivo desarrollo de las ciudades, existe una deficiencia de atención en la supervisión y manejo de estas áreas, así como la carencia de la tecnología y la estructura para obtener datos actualizados de la situación ambiental de los ecosistemas afectados.

El Río Pesquería es uno de los 3 ríos urbanos de la AMM (Figura 4), que atraviesa 5 municipios, García, Monterrey, Escobedo, Apodaca y Pesquería. En la Figura 4 se muestra la morfología del río y los límites municipales que cruza en cauce. Éste pertenece a la región hidrológica- administrativa de Río Bravo. Nace en la serranía de Nacataz, en Coahuila y Nuevo León. Es un tributario del río San Juan, posterior a los centros de población mencionados, descarga sus aguas en el río Salinas en coordenadas UTM de 401,849E, 2, 850,019N, conectando con la Presa “El Cuchillo” (Ferriño Fierro, 2004). El flujo se incrementa luego de atravesar la parte norte de la Zona Metropolitana de Monterrey debido a la captación de aguas tratadas de origen municipal proveniente de distintas plantas de tratamiento.

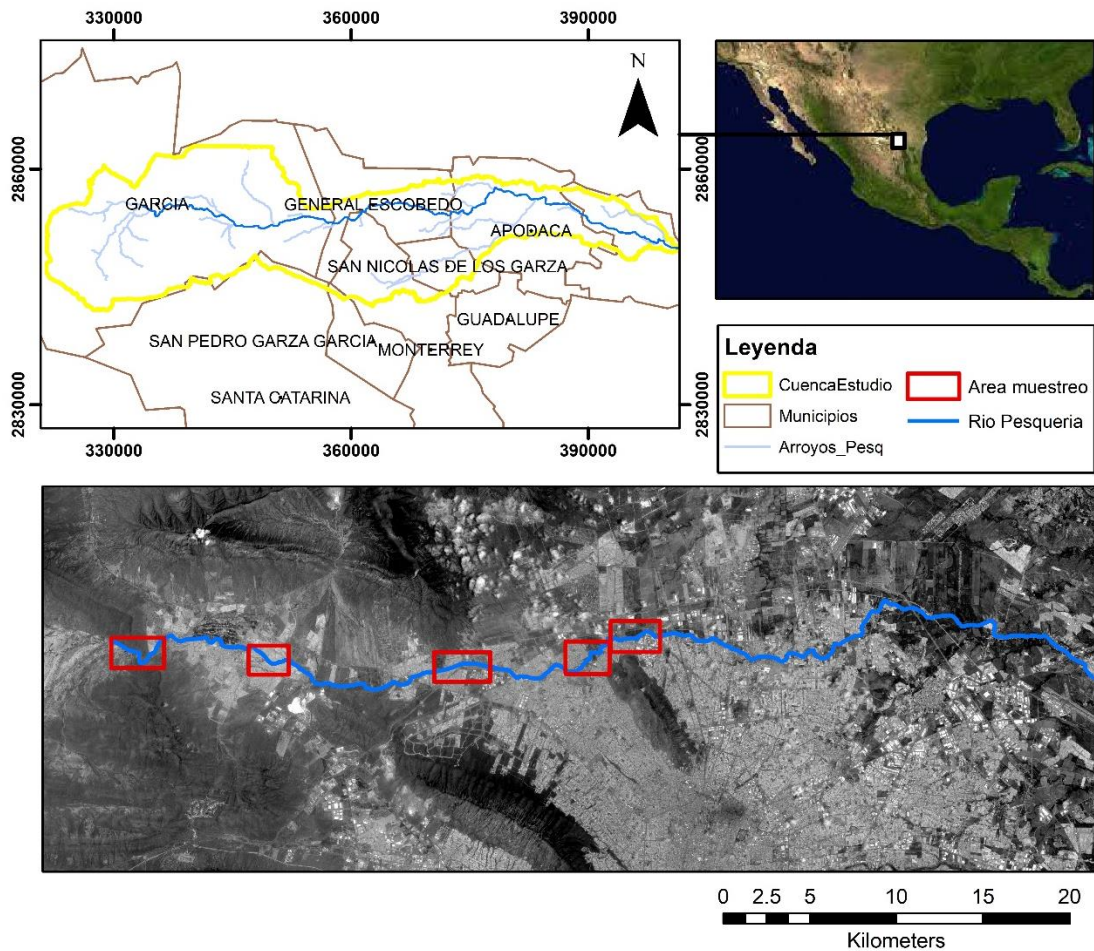


Figura 4. Mapa de localización del río urbano Pesquería

Según lo reportado por Mendoza, D. en 2013, en el municipio de General Escobedo, N.L., existen tres descargas permitidas: una es de una planta de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, donde se encuentra un área de tratamiento de agua residual, una de PEMEX, que consiste en gas y petroquímica básica y otra de Metales Refinados S.A de CV. El municipio de Apodaca es también el que descarga más desechos al Río Pesquería. Algunos de ellos están regulados y cuentan con permiso, como las cuatro plantas de tratamiento de agua residual de Agua y Drenaje, localizadas en: Santa Rosa, Noreste, Pesquería y Dulces Nombres, además de la empresa Piel y Grasas S. A. de C.V.

El río Pesquería cuenta con áreas donde la contaminación es visible, debido a la acumulación de residuos sólidos en el lecho de éste, como se puede apreciar en la figura 5B, debido a la cercanía que tienen los poseedores, a diferencia de algunas otras áreas

(Figura 5A) en las que aún se puede apreciar una distancia considerable entre la urbanización y el cauce del río.



Figura 5. Imágenes aéreas del área de estudio obtenidas con VANT. A. Área de inundación despejada con amplia vegetación. B. Asentamientos irregulares invadiendo el área de inundación con desechos sólidos en el cauce del río.

1.5.2 Características socioeconómicas y ambientales

1.5.2.1 Clima

Las lluvias extremas son el origen principal de inundaciones en la zona. En los registros históricos de las estaciones climatológicas cercanas al municipio de Escobedo se han presentado lluvias máximas en 24 horas, de hasta 253 mm en 1988 y 280 mm en el año 2010. En el Atlas de Riesgos Naturales del municipio de General Escobedo se tiene

registro de lluvias mensuales máximas de hasta 489mm. Un ejemplo fue el Huracán Gilberto (1988), el cual provocó desbordamientos no sólo en el río Pesquería si no también en los otros ríos del AMM.

Además de los problemas de inundación provocados por la lluvia, estudios demuestran que la precipitación es un factor que debe ser tomado en cuenta en la calidad del agua de los ríos urbanos debido a que el aumento de la escorrentía potencia el efecto de dilución y reduce el tiempo de residencia de los contaminantes en los ríos, disminuyendo la concentración de contaminantes (Yang, Li, Zhou, Feng, & Dong, 2021).

1.5.2.2 Hidrología

Los ríos o segmentos de ríos en subcuencas con una hidrogeología que consiste en lecho de roca sólida o acuíferos someros dependen en gran medida de la precipitación para su escorrentía y presentan períodos regulares de estiaje. La calidad del agua de dichos ríos está determinada principalmente por la composición del agua de lluvia y los procesos del suelo poco profundo (Montgomery & Buffington, 1997; Rinaldi et al., 2016).

Las subcuencas con múltiples aportaciones de drenaje artificial se caracterizan a menudo por caudales irregulares. Esto puede tener un efecto significativo en la dinámica del flujo y la calidad del agua (Rinaldi et al., 2016). Los ríos urbanos con una naturaleza de flujo irregular suelen ser menos resilientes en el tema de degradación de contaminantes.

Un concepto importante para el estudio de las cuencas hidrológicas es el de conectividad. Éste habla de transferencia de materiales, comprender y predecir las respuestas geomórficas a los cambios de entrada y las condiciones límite; y para determinar áreas prioritarias de atención para la recuperación de los sistemas (Wohl et al., 2019).

Como se mencionó anteriormente, condiciones antropogénicas pueden jugar un papel importante en la modificación de la conectividad. Sin embargo, es posible que con una correcta caracterización de la conectividad se logre integrar suficiente información para el monitoreo de ésta. Además, la conectividad también se encuentra relacionada con la calidad de la vegetación en zonas riparias. Esto incrementa la necesidad de comprender la interacción de los afluentes en el cauce principal del río (Estrany et al., 2019).

El área de estudio pertenece a la cuenca hidrológica del río San Juan, cuyos tributarios son considerados ríos de montaña. La llamada cuenca del río San Juan se ubica en los estados de Coahuila, Nuevo León y de Tamaulipas y drena un total de 30,562 km² hasta el sitio de la Presa del Azúcar, en Camargo Tamaulipas (Guerrero, 2011). Los afluentes del río San Juan son; Pesquería, Santa Catarina y el Ramos-Pilón que en el rancho las Adjuntas en el municipio de Doctor Coss, se le une al río Pesquería.

Estudios hidrológicos e hidráulicos se han llevado a cabo en la cuenca del río Pesquería, como lo publicado en 2015 por Ferriño, A., & Burgos, D. “Delimitación de zonas federales y áreas de amortiguamiento en ríos afectados por el crecimiento urbano como estrategia para prevenir inundaciones. Caso de estudio: cuenca del río Pesquería (México)” donde se desarrolló una propuesta para determinar áreas de amortiguamiento en los ríos afectados por el crecimiento urbano, para prevenir inundaciones, basada en aspectos técnicos, legales y ambientales.

1.5.2.3 Pendiente

La pendiente del terreno se expresa como la variación de altitud entre dos puntos del terreno, en relación con la distancia que los separa (Montgomery & Buffington, 1997), por lo tanto, la pendiente es la característica superficial del terreno en relación al plano horizontal, pudiendo medirse en grados (de 0 ° a 90 °) o en porcentaje. La pendiente podría afectar la cobertura vegetal a través de sus impactos en las actividades humanas, el clima local y la erosión del suelo (Y. T. Gao & Gao, 2014).

El factor de la pendiente se encuentra relacionado con la calidad del agua, a través del concepto de régimen de flujo, el cual permite comparar la morfología y la hidrología y analizar el cambio hidrológico (Rinaldi et al., 2016). La calidad del agua es sensible a los cambios en la velocidad del caudal. Por ejemplo, al reducir la velocidad del caudal las concentraciones de sustancias que se agregan más o menos continuamente, pero en cantidades bajas (por ejemplo, de plantas de tratamiento de aguas residuales), aumentarán y podrían alcanzar niveles tóxicos para los organismos. Un flujo de caudal, bajo puede provocar eutroficación con niveles de nitrógeno muy altos (Nilsson & Renöfält, 2008).

Los períodos de flujo bajo en verano representan el período de crecimiento más importante para las plantas ribereñas, siempre que haya suficiente precipitación para sustentar el crecimiento (Williams et al. 2006).

La incorporación del análisis de la pendiente permite comparar la morfología y la hidrología y analizar el cambio hidrológico. Este enfoque aborda varios aspectos complementarios del sistema de corredores fluviales, para promover la comprensión integrada de los procesos fluviales con fines de gestión.

1.5.2.4 Uso de suelo y vegetación

El uso de suelo en el área de estudio adquiere mayor relevancia debido a que representa una de las razones principales de la vulnerabilidad del río Pesquería. Los asentamientos humanos y negocios irregulares conllevan al acumulamiento no reglamentado de residuos sólidos en la planicie de inundación del río.

En el nivel estatal, la representatividad para la cobertura y uso de suelo en esta zona es: 2.22% de bosques, 48.72% de vegetación arbustiva, 27.35% con actividad pecuaria y agrícola y 5.47% zona urbana. El cambio en el uso de suelo es muy intenso, siendo lo más representativo una pérdida de área agrícola y de pastizal de 1.95% anual y un incremento de asentamientos humanos de 3.15% anual (INEGI, 2010).

En el nivel municipal, el uso de suelo y vegetación varía porcentualmente a lo largo del cauce del río. El nacimiento del río Pesquería se encuentra al Oeste en el municipio de García, donde se forma por los escurrimientos de los cerros “El Fraile” perteneciente a la región de Sierras y Llanuras Coahuilenses, en la parte alta de la exposición sur de la sierra y “La Mota” en la Sierra Madre Oriental, Pliegues Saltillo-Parras. El uso de suelo del área de la ribera se divide en zonas industriales y habitacionales en su mayor parte, según lo descrito por el Plan de Ordenamiento Territorial para el Desarrollo Urbano del Municipio de García Nuevo León.

En el municipio de Monterrey y el de Escobedo se encuentra la elevación del cerro del Topo Chico, perteneciente a la Provincia Grandes Llanuras de Norteamérica, Llanuras y Lomeríos. El uso de suelo es industrial y residencial en su mayor parte. En los márgenes del río Pesquería y en las faldas del cerro del Topo Chico se registran asentamientos

humanos irregulares, con uso predominantemente habitacional, de 500 familias (Plan Municipal de Desarrollo 2015-2018). El municipio de Apodaca, que carece de elevaciones o montañas, es atravesado por el Río Pesquería y beneficia los campos de cultivo de Santa Rosa y de Agua Fría. La principal actividad económica en el municipio es la industria y, cada vez en menor escala, la agricultura y la ganadería.

La mayor parte de la cobertura vegetal media se encuentra localizada en la planicie de inundación del río, catalogada como vegetación riparia. Dicha vegetación siendo indispensable para la eliminación de contaminantes (Esse et al., 2019) y continuamente afectada por las actividades urbanas (Zermeño-Hernández et al., 2020). Se considera en este proyecto como un factor para la sectorización de zonas carentes de salud ambiental.

1.5.2.5 Calidad del agua

Todo cambio en la calidad del agua natural implica contaminación. Las propiedades del agua se pueden deteriorar por algunos fenómenos naturales, como los huracanes, las corrientes de lodo y las lluvias torrenciales; sin embargo, los contaminantes antropogénicos son los que resultan en una verdadera alteración del entorno.

A través de los años, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), mediante la red de medición de la calidad del agua, ha muestreado anualmente más de 5000 sitios en todo el país. Los 5 parámetros utilizados para monitorear la calidad son: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Disueltos Totales (SDT), Sólidos Suspendedos Totales (SST) y Coliformes Fecales (CF). Además, categorizan cada uno de estos parámetros en los siguientes niveles: excelente, buena calidad, aceptable, contaminada y fuertemente contaminada. Algunos de los sitios de muestreo se encuentran localizados sobre el cauce del río Pesquería.

De acuerdo con los datos oficiales del monitoreo de calidad del agua de CONAGUA de 2019, el río Pesquería reporta sitios de muestreo con valores que van desde agua con calidad aceptable ($DQO > 20$ y ≤ 40 mg/l) hasta sitios con agua contaminada ($DQO > 40$ y ≤ 200 mg/l). En la Figura 6 se pueden localizar algunos de los puntos fijos de muestreo delimitados por CONAGUA y su clasificación según los valores de DQO.

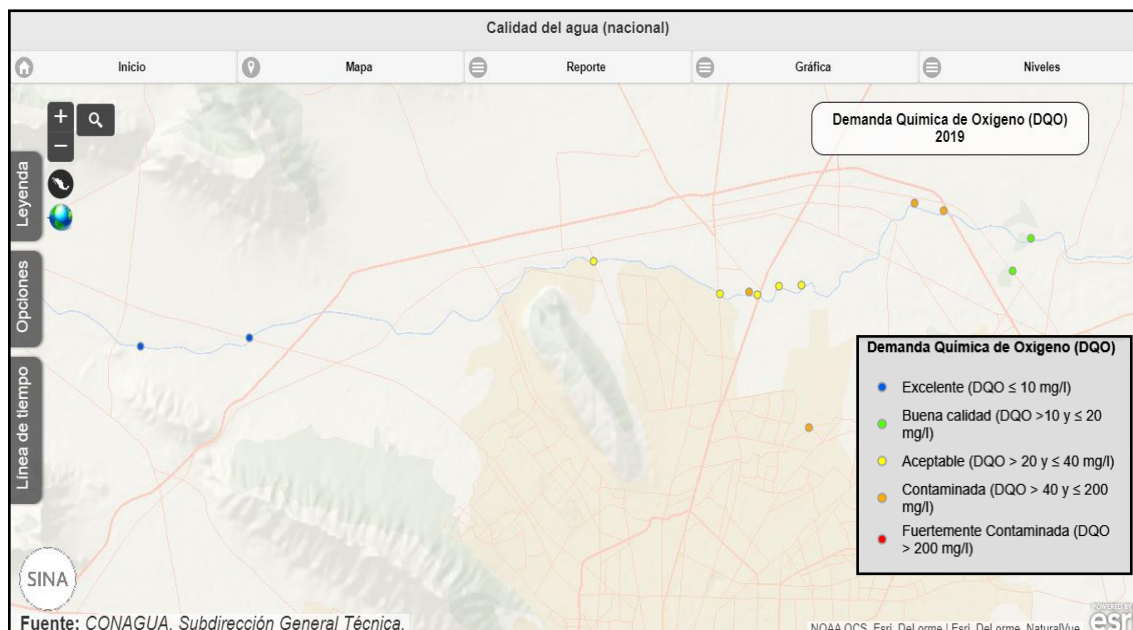


Figura 6. Fragmento del mapa digital de calidad del agua según DQO perteneciente al Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), CONAGUA. <http://sina.conagua.gob.mx/>

Los reportes correspondientes a estos análisis se presentan en la página de gobierno del SINA. Dicho sistema ofrece un reporte georreferenciado de las características de calidad del agua de distintos puntos de muestreo. La actualización en los análisis de calidad del agua se realiza de manera anual, describiendo no sólo los resultados de los indicadores de calidad del agua, sino también la ubicación de éste (ver Tabla 2).

Tabla 2. Resultados para calidad del agua por análisis de DQO en muestras de agua del Río Pesquería. Base de datos del SINA, 2019. (CONAGUA)

DATOS		
ESTACIÓN	DQO	CLASIFICACIÓN
Parque Nacataz	5 mg/l	Excelente
Aguas bajo puente Alkali	5 mg/l	Excelente
Puente Lincoln	5 mg/l	Excelente
Avenida parque industrial	34.8 mg/l	Aceptable
Aguas arriba PTAR norte	26.69 mg/l	Aceptable
Aguas abajo PTAR norte	81.19 mg/l	Contaminada
Escobedo	37.72 mg/l	Aceptable
Metales refinados aguas abajo	34.15 mg/l	Aceptable
Pieles y grasas aguas abajo	37.39 mg/l	Aceptable
Aguas arriba PTAR santa rosa	96.53 mg/l	Contaminada
Aguas abajo PTAR santa rosa	84.7 mg/l	Contaminada
Aguas abajo PTAR agua fría	16,4 mg/l	Buena calidad

Peñitas aguas arriba PTAR Pesquería	60.41 mg/l	Contaminada
Aguas arriba PTAR dulces nombres	58.19 mg/l	Contaminada
La arena	66.1 mg/l	Contaminada

La CONAGUA se ha encargado del monitoreo de la calidad del agua dulce del país, desde hace ya 50 años, utilizando únicamente parámetros fisicoquímicos; sin embargo, no se tiene registro de una evaluación multidisciplinaria, que considere otros factores que participan en estos ecosistemas. Esto ha generado un área de oportunidad en la gestión de este recurso vital.

La comunidad científica de México ha desarrollado una gran cantidad de proyectos para la evaluación ambiental de los ríos. En Nuevo León se han realizado trabajos diversificando el análisis de calidad del agua con métodos biológicos, utilizando comunidades de macroinvertebrados e insectos acuáticos (Castro-López et al., 2019b; Torres, 2013). En el tema de gestión Monforte, en 2013, propuso un estilo de gestión del recurso hídrico para el AMM que propiciaría la equidad social con base en las variables críticas de gestión del agua. Recientemente Vidales Rojas, (2018) trabajó para determinar la percepción social del entorno el río Pesquería, generando información importante sobre el factor social. Desde una visión de prevención se ha dado importancia a la delimitación de áreas de amortiguamiento, como estrategia para prevenir inundaciones (Ferreño, A., & Burgos, D. 2015).

1.5.2.6 Factores antropogénicos

Demografía

Aunque según la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2019) la demografía es la ciencia que tiene por objeto el estudio del volumen, estructura y dinámica de las poblaciones humanas, desde un punto de vista principalmente cuantitativo, algunas consideraciones teóricas sobre la demografía afirman que es una ciencia que determina la historia de las poblaciones humanas ocurridas en un tiempo y en un espacio. Estos eventos son determinados por características biológicas, sociales y son impactados por fenómenos ambientales, sociales y económicos.

Este último aspecto respalda que la tasa de crecimiento poblacional resulta fundamental para la formulación de políticas públicas de naturaleza ambiental, económica y por su vinculación con la disponibilidad vinculada a la disponibilidad de recursos y su utilización.

El crecimiento demográfico global ha dado paso a una urbanización acelerada, que a su vez tiende a estar acompañada de un incremento significativo de comunidades potencialmente vulnerables. En un panorama general sobre el mal manejo de los recursos naturales se encuentra, entre otros, la contaminación de los ríos y de los mares, con aguas servidas o residuales, con escurrimientos agrícolas y con desechos industriales.

Una de las causas puntuales de la contaminación de los ríos es el crecimiento demográfico, cuya consecuencia es el aumento en la densidad poblacional. Entre mayor sea el número de habitantes, más residuos y descargas se generarán. Según Ibararán Viniegra et al., 2017, los datos de CONAGUA demuestran que existe una relación entre el aumento de población y los contaminantes de sólidos suspendidos y levemente en los valores de DQO en aguas nacionales (ver Figura 7).

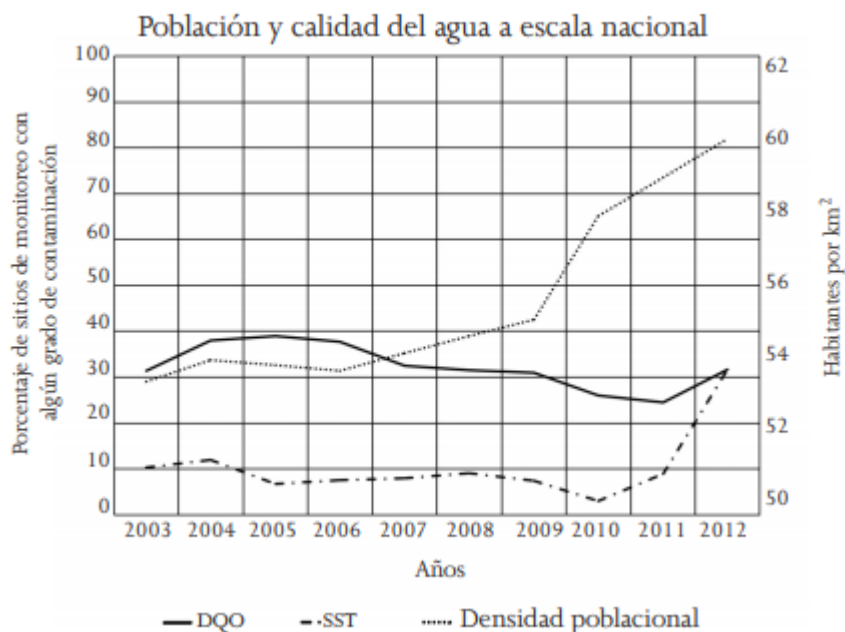


Figura 7. Relación de población y calidad del agua según datos de CONAGUA (2003-2012). Tomado de Ibararán Viniegra et al., 2017.

Puntos de descarga

El crecimiento exponencial de la urbanización ha propiciado que un alto porcentaje de aguas residuales no tratadas sean evacuadas en los cuerpos de agua nacionales. Los requerimientos para el drenaje de las ciudades incrementan y las soluciones resultan en obras de canalización que descargan en los ríos urbanos, ya que mientras mayor sea la actividad económica (actividad agrícola e industrial), más serán los residuos que se descarguen a los ríos y, si no se tratan, pueden reducir la calidad de su caudal.

La operación de las plantas de tratamiento de agua (PTAR) participa en la recuperación de las aguas residuales de las ciudades y, según los datos de CONAGUA, el número de plantas ha aumentado, al igual que el caudal tratado. Sin embargo, según Ibararán Viniegra et al., 2017 en su estudio de “Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México” esto no ha reducido el porcentaje de sitios con agua contaminada y fuertemente contaminada entre 2003 y 2012 (ver Figura 8).

Plantas de tratamiento, caudal tratado y contaminación de agua de ríos

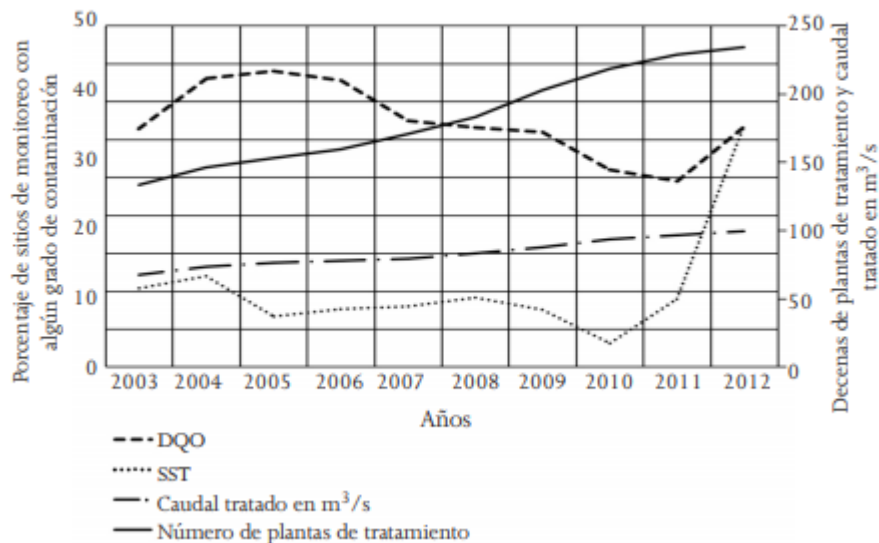


Figura 8. Relación entre el número de caudal tratado por PTAR y el porcentaje de sitios monitoreados contaminados. Tomado de Ibararán Viniegra et al., 2017.

Según lo reportado por CONAGUA en el Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación de 2019, en Nuevo León se cuenta con 55 plantas de tratamiento municipales en funcionamiento, de las

cuales, 6 (ver Tabla 3) tienen como cuerpo receptor al río Pesquería y 1 al arroyo Topo Chico, el cual desemboca en el mismo río.

Tabla 3. Plantas de tratamiento (PTAR) que tienen como cuerpo receptor al Río Pesquería

Plantas de Tratamiento			
PTAR	Localidad	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo Receptor
García	García	101	Río Pesquería
Norte	Gral. Escobedo	2573	
Santa Rosa	Apodaca	128	
Noreste		1340	A. Topo Chico
Pesquería	Pesquería	15	Río Pesquería
Dulces Nombres		7122	
Pesquería II	Marín	54.0	

La Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento categoriza a las PTAR de acuerdo con el caudal tratado en litros por segundo (l/s), va desde menor que 5 hasta mayor que 1000. Para este trabajo se utilizará como referencia dicha clasificación, para la revalorización de cada punto en el análisis multicriterio.

Asentamientos humanos irregulares

En general, las cuencas hidrográficas actúan como sistemas de relaciones sociales y económicas y son de vital importancia para los seres vivos. Otorgan además otros beneficios como la generación de ambientes propicios para los asentamientos humanos, sin embargo, en los márgenes del área de estudio se encuentran sectores de asentamientos humanos irregulares.

Estos sitios son los que cuentan con el mayor impacto ambiental negativo. Debido al crecimiento urbano reciente, estas zonas sufren de escasa planificación y han crecido mediante el desarrollo espontáneo e irregular. Por otra parte, cuentan con bajo nivel de infraestructura de servicios, se encuentran inmersos en suelos de usos industriales y de algunas zonas residenciales.

Uno de los mayores problemas en la zona de estudio de este proyecto es que los asentamientos se encuentran dentro de la zona de inundación del río. En su mayoría ocupados por personas de bajos recursos, incrementando el riesgo a la población y la

vulnerabilidad ambiental; ya que, por lo regular, los residuos sólidos y líquidos producidos en dichos asentamientos son directamente vertidos al río.

Resulta de gran importancia la inclusión de este factor en los modelos de caracterización de la calidad ambiental; ya que, como ya se mencionaba, las cuencas hidrográficas se encuentran estrechamente relacionadas con el desarrollo de las ciudades. Uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 11) de la ONU es promover ciudades y asentamientos humanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Esto muestra que se busca generar políticas, planes y proyectos tendientes a descentralizar el desarrollo en sectores urbanos consolidados, abriendo nuevas oportunidades en áreas potenciales que tienen un gran valor paisajístico. Por otra parte, en el ODS 3 se habla de garantizar una vida sana y promoviendo el bienestar de la población en torno a las actividades residenciales de los diferentes perfiles socioeconómicos que habitan próximos a la cuenca.

Las cuencas son, además, una unidad natural que sirve de base para articular procesos de gestión que tienden al desarrollo sustentable (Solano, 2011).

2 MÉTODO

2.1 Trabajo previo

Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto "Desarrollo de tecnología espectral y sistemas aéreos autónomos para monitorear los niveles de contaminación en el agua en ríos urbanos", PAICYT 2019, a cargo del Cuerpo Académico de Ciencias del Agua (CA 080) del Instituto de Ingeniería Civil, en el que se tiene como objetivo general generar un sistema de medición de la materia orgánica soluble, integrando tecnología espectral y vehículos aéreos autónomos para cartografiar el grado de contaminación de los ríos urbanos. Con motivo de la realización de este proyecto se realizaron planes de vuelo y levantamiento con dron y cámara espectral; así mismo, se realizó un muestreo de agua para su posterior análisis de calidad, mediante métodos químicos y fisicoquímicos.

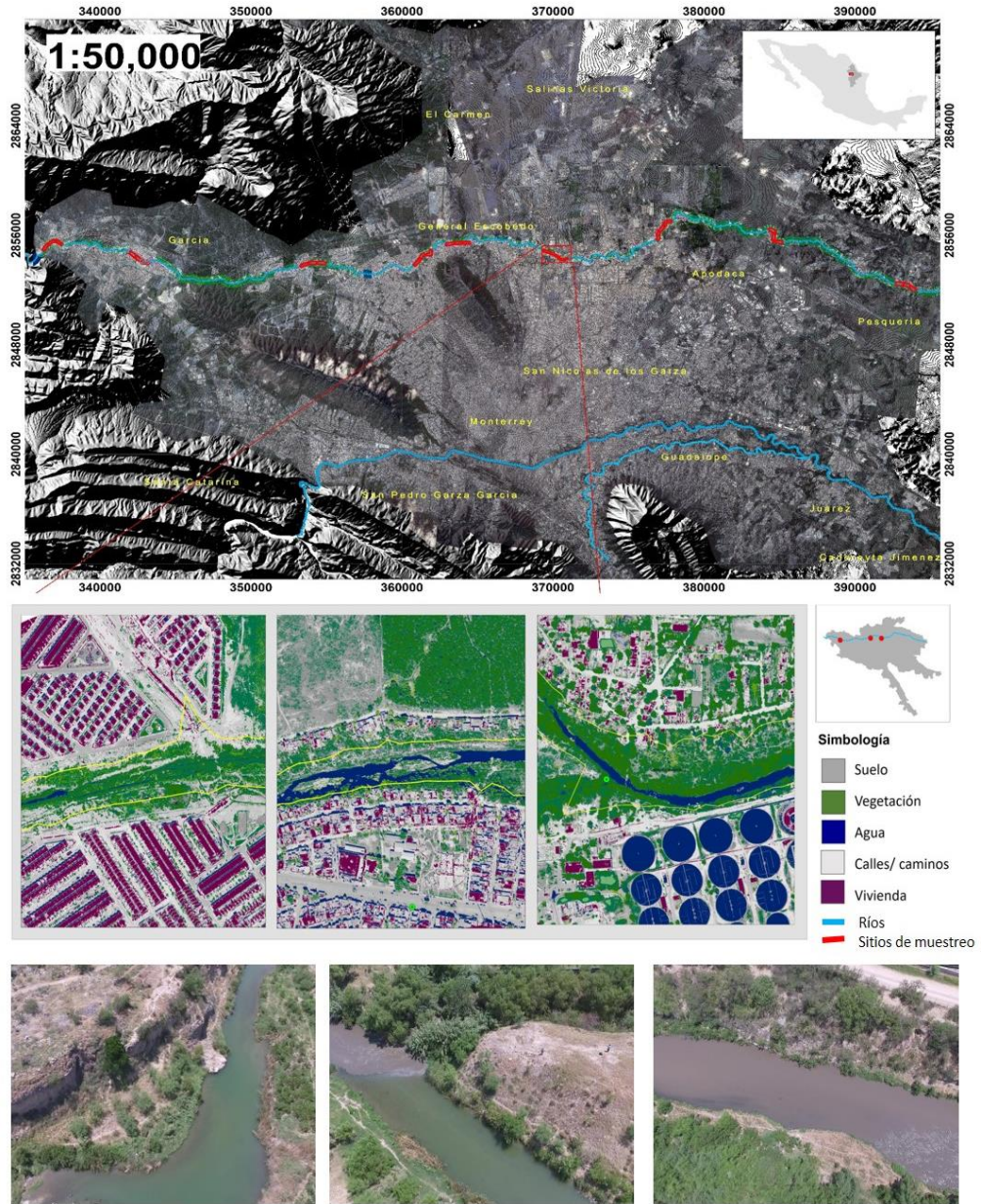


Figura 9. Fase 1 del proyecto. En la parte superior se pueden observar los lugares prospectos para muestreo en color rojo. En la parte central la clasificación, y en la parte inferior imágenes aéreas del río Pesquería. Elaborado por el Departamento de Geomática, IIC.

Para la primera fase de este proyecto se realizó una clasificación con las imágenes obtenidas de los vuelos con dron y con información satelital proporcionada por Google Earth. Se tomaron en cuenta 5 clasificaciones: suelo, vegetación, agua, calles/caminos, viviendas /estructuras urbanas. De esta manera fue posible determinar los lugares prospectos para el muestreo del agua (Figura 9).

2.2 Recursos

2.2.1 Equipo

Drone Phantom 3 de cuatro hélices, marca DJI. Cuenta con una cámara de 12.4 Megapíxeles (MPix) efectivos, con un tiempo de operación de 23 minutos aproximadamente por batería.

Drone Inspire II DJI, con una calidad fotográfica de 24 MPix y un tiempo de operación de hasta 27 minutos.

Cámara multispectral Parrot Sequoia de 16 MPix, con 4 bandas disponibles GREEN (550BP 40), RED (660BP40), REDEEDGE (735BP 10) y NIR (790BP 40). Para poder obtener las fotos aéreas, los VANT fueron adaptados con un soporte y un arnés para soportar y dar estabilidad a la cámara.

Empleada principalmente en la agricultura de precisión, para estimar la calidad, y vitalidad de cultivos a través de la cantidad de absorción y reflexión de la luz, gracias a los sensores RGB y multispectral, los cuales simultáneamente captan imágenes en cuatro bandas especiales, permitiendo apreciar el espectro electromagnético de la luz; es decir, lo que es visible y no al ojo humano (Parrot SA.) (Figura 10C).



Figura 10. A. Drone Inspire II. B. Drone Phantom 3. C. Cámara multispectral Parrot Sequoia.

2.2.2 Recursos digitales

Imágenes Satelitales

El satélite Sentinel 2 proporciona imágenes con 13 bandas de información. Las imágenes se encuentran disponibles de manera gratuita en la plataforma Copernicus Services Data Hub de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Se realizó la descarga de 4 imágenes satelitales captadas por Sentinel 2; en su versión 2A, las cuales cuentan con una corrección atmosférica predeterminada. Para la selección de imágenes se contempló la correlación entre las fechas de vuelos realizados con VANT y además un porcentaje menor que el 10% de nubosidad. Las fechas en las que no se encontraron imágenes con esta característica fueron descartadas del estudio.

El preprocesamiento de dichas imágenes para la corrección atmosférica y un mejoramiento en la resolución de las bandas a 10 m.

Modelos digitales de elevación

Un modelo digital de elevación (MDE) es un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar, derivado de la obtención de puntos mediante tecnología LIDAR (detección y medición a través de la luz).

Los tipos MDE utilizados fueron Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución de superficie (MDS) y de terreno (MDT). Cuentan con una resolución de 5 x 5 m obtenido a partir del procesado de un levantamiento LIDAR aéreo, proporcionado por INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

Red Nacional de Calidad del Agua

Se hará uso de la capa de información disponible con los datos reportados para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) 2019. Fuente: CONAGUA. Subdirección General Técnica.

Base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de CONAGUA para el mapeo de descargas de aguas al río Pesquería

2.3 Trabajo de campo

2.3.1 Levantamiento con VANT y toma de fotografías.

Para el levantamiento fotogramétrico se realizan planes de vuelo programados mediante el servicio en línea de DroneDeploy Versión 2.35.0 el cual permite realizar un plan de vuelo y la supervisión de éste durante la práctica, además de poder estimar el área, la distancia, la altura y el tiempo de vuelo recorrido para el mismo.

Para la planeación del trabajo de campo se programaron los vuelos siguiendo un método por cuadrantes (Figura 11), con un promedio de 7 hectáreas de área por cuadrante con un “buffer” aproximado de 80 metros, perpendicular al río. Así mismo, se le incorporó al dron una cámara multiespectral Parrot.

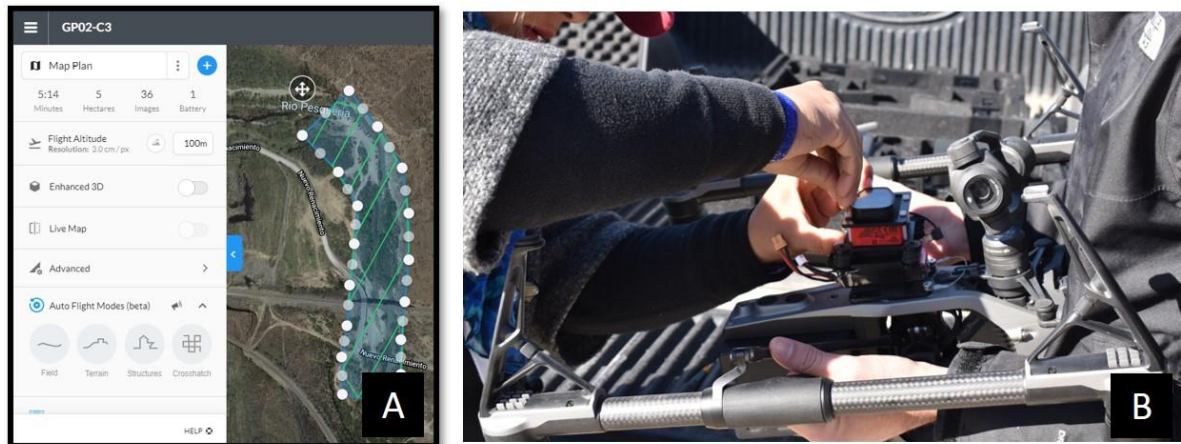


Figura 11 A. Plan de vuelo en plataforma DroneDeploy. B. Cámara Parrot Sequoia siendo asegurada al dron Inspire II por parte del equipo de Geomática.

Los vuelos se realizaron a una altura promedio de 75 m sobre el nivel del suelo, y se utilizaron bandas paralelas para lograr una superposición directa aproximada del 80% y al menos un 70% de superposición lateral. La altura de algunos de los vuelos fue modificada, debido a que en algunas áreas de interés se requería cubrir una mayor distancia.

Se realizó un total de 8 salidas a campo, cumpliendo un total de 16 vuelos. Algunos de los vuelos planeados para el municipio de Pesquería fueron modificados, debido a que algunas zonas pertenecían al espacio aéreo restringido por la ubicación del aeropuerto internacional Mariano Escobedo.

Durante estos vuelos se recopilaban imágenes RGB de alta resolución y para la obtención de imágenes multiespectrales se montó sobre el dron una cámara multiespectral Parrot Sequoia. La plataforma utilizada de montaje es producto de una impresión 3D de las piezas. En la parte inferior del VANT se coloca la cámara y sobre de ella la batería; en la parte superior del dron se coloca un receptor de luz que ayuda a calibrar lo obtenido por el obturador de la cámara. La toma de fotografías de esta cámara es independiente de la cámara del dron, por lo que estas fotografías se programaron para tomarse en un lapso

continuo de 5 segundos, colocando la cámara en dirección a nadir (ver Figura 12), es decir completamente vertical en dirección al suelo. Esta cámara cuenta con una lente por cada región espectral, por lo que el resultado es la toma de 5 fotografías para el mismo lugar, cada 5 segundos.

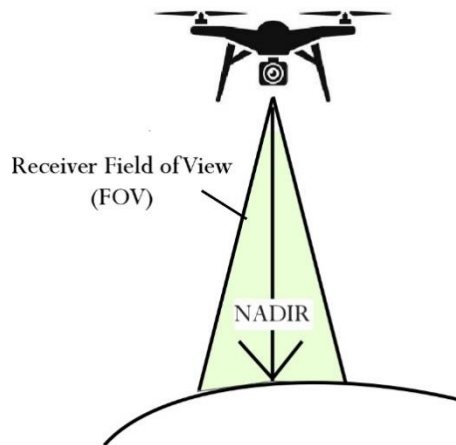


Figura 12. Diagrama de visualización de ángulos en un VANT.

2.3.2 Muestreo de agua

La 1er. campaña de muestreo consistió en la recolección de 28 muestras sistemáticas de agua, a cargo del Departamento de Ingeniería Ambiental del IIC (Figura 13). Sobre las muestras se determinó la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La toma y preservación de las muestras de agua, así como todas las determinaciones analíticas de DQO en las muestras de agua, se desarrollaron bajo los parámetros recomendados por la Norma Mexicana, NMX-AA-003 Aguas residuales – Muestreo.

En este caso, los puntos para obtener la muestra fueron seleccionados de manera “in-situ” ya que se debía identificar el espejo de agua y la vía de acceso más segura. Esto fue posible realizando el levantamiento fotogramétrico primero, y haciendo una revisión rápida de las fotografías en el sitio.



Figura 13. Fotografía tomada en campo durante la realización del levantamiento fotogramétrico. B. Muestras de agua recolectadas para el análisis de DQO.

2.4 Preprocesamiento de los datos

2.4.1 Procesado fotogramétrico

Este proceso se realiza por medio de las imágenes de alta resolución obtenidas con el VANT y las imágenes multiespectrales captadas por la cámara multiespectral Parrot Sequoia. Consiste en realizar un procesamiento (ver Figura 14) en el que el objetivo principal es convertir los datos bidimensionales (imágenes) en información cartográfica/tridimensional.

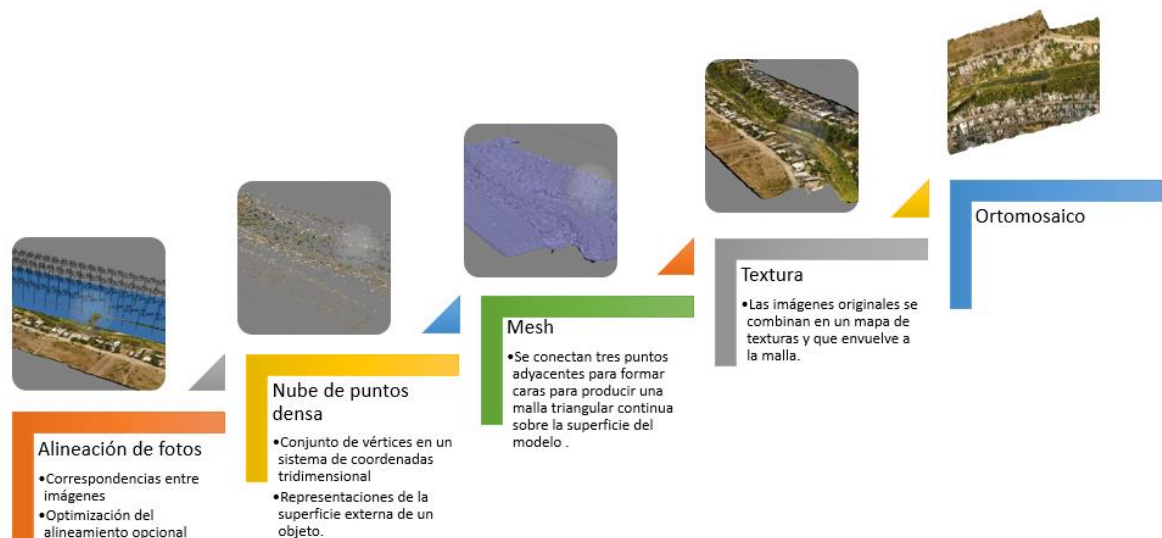


Figura 14. Proceso fotogramétrico para la generación de ortomosaicos.

Los ortomosaicos generados permiten obtener información tridimensional de la superficie. El proceso descrito fue aplicado de igual manera para las fotografías obtenidas con la cámara multispectral. En este caso fue necesario realizar la separación de las imágenes por cada una de las bandas disponibles; RED, NIR, GREEN y REG (Figura 15). Los ortomosaicos de cada una de las bandas contienen información sobre la reflectancia en cada uno de los intervalos de longitud de onda.

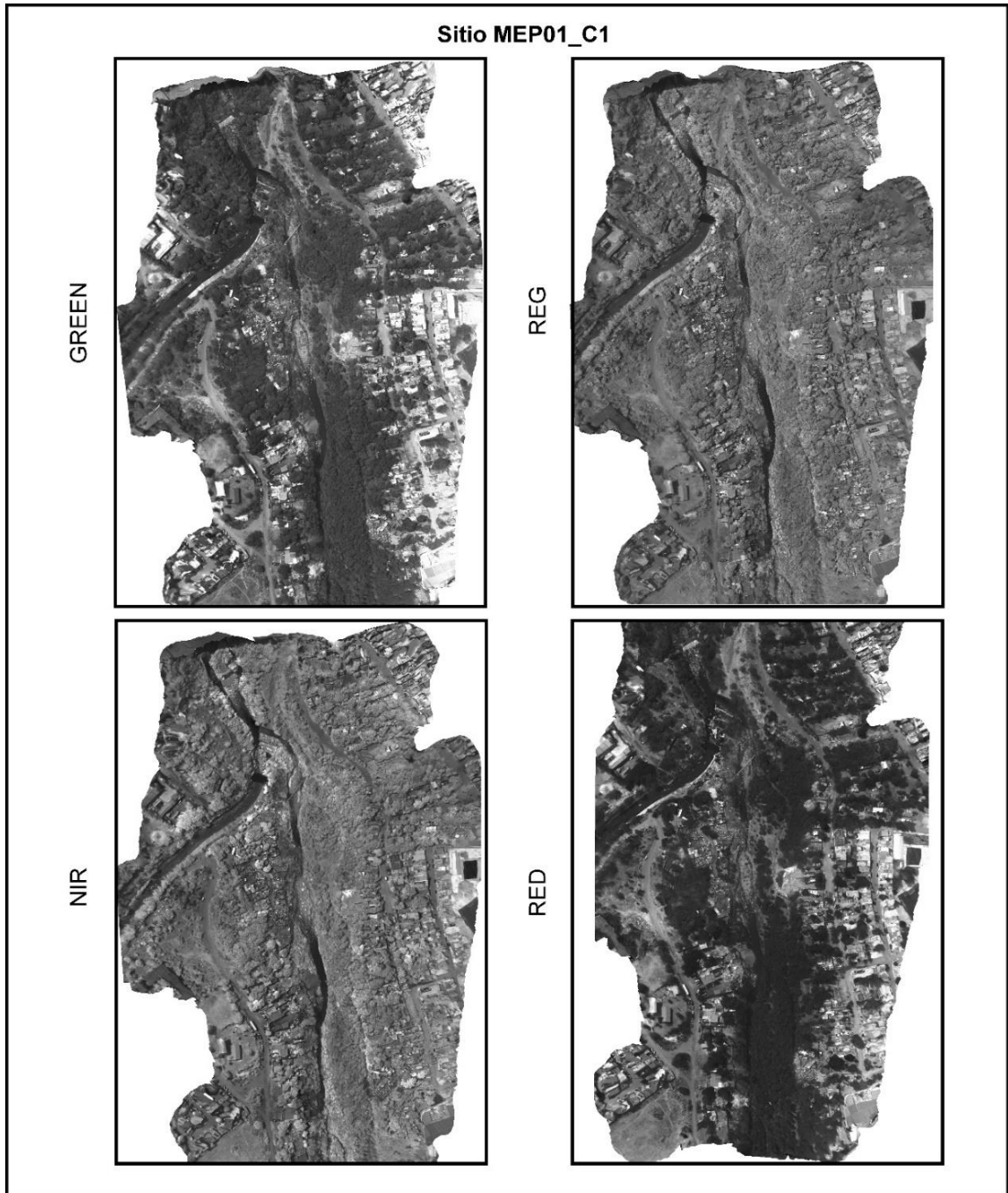


Figura 15. Ortomosaicos pertenecientes al sitio MEP01_C1, generados para cada una de las bandas disponibles proporcionadas por la cámara multiespectral.

Las fotografías utilizadas de cada vuelo fueron filtradas y seleccionadas con la intención de obtener un mejor procesamiento y mejores resultados y calidad en los ortomosaicos, sin embargo, en el manejo de información pueden ocurrir errores difíciles de detectar.

Esto limitó y dificultó algunos resultados en el procesamiento de las imágenes, y la generación de los ortomosaicos (Figura 16) ya que de 16 levantamientos realizados únicamente se tienen resultados favorables en 11 de los sitios de muestreo.

Posterior a la obtención de los ortomosaicos, fue necesario realizar una georreferenciación de los ortomosaicos multiespectrales.

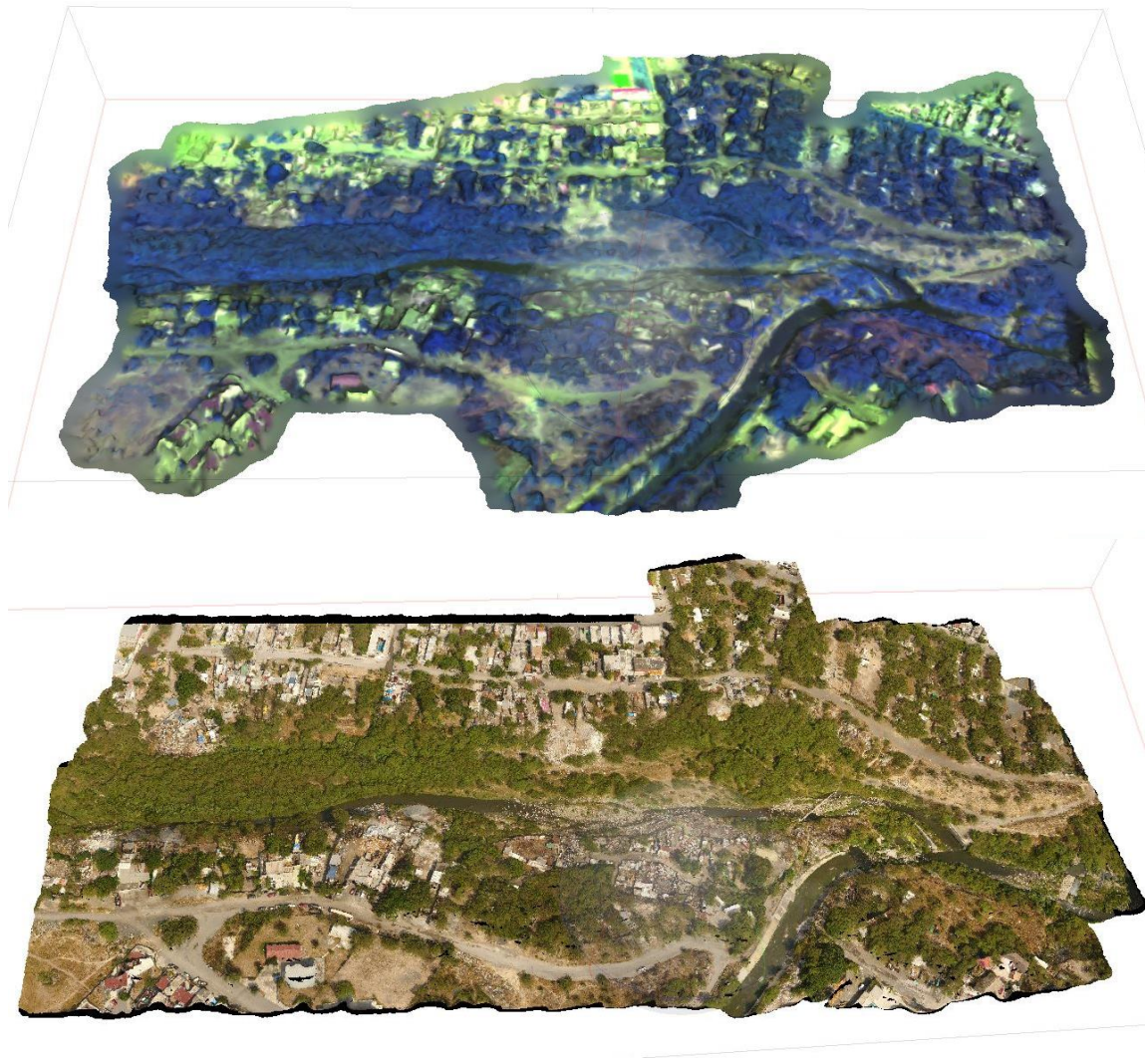


Figura 16. Ortomosaicos multiespectral (superior) y RGB (inferior) pertenecientes al sitio de muestreo EP01 en el municipio de General Escobedo, N.L.

2.4.2 Imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes gratuitas de Sentinel-2^a, obtenidas mediante el portal de Copernicus Services Data Hub. Dichas imágenes se encuentran previamente corregidas atmosféricamente por el algoritmo Sen2Cor de la Agencia Espacial Europea (ESA) (Nivel-2A). Las imágenes seleccionadas contemplaron un porcentaje menor que el 10% de nubosidad, considerando el intervalo de fechas para el muestreo de agua, del 13 de junio de 2019 al 29 de agosto del mismo año. Finalmente, la imagen del 8 de agosto de 2019 (S2A_tile_20190808_14RLP_0_R10B04) fue la seleccionada para el cálculo de NDVI y GNDVI, debido a que esta imagen presentaba menor nubosidad.

2.4.3 Análisis multicriterio SIG

El método de toma de decisiones con criterios múltiples o multicriterio (MCDM) se aplica cuando un decisor tiene que elegir entre un conjunto de alternativas, continuo o discreto, teniendo en cuenta distintos criterios o puntos de vista (Malczewski, 2006).

Este proyecto propone la valoración de los distintos factores que intervienen en la calidad ambiental de los ríos urbanos y además de en los factores ambientales, se centra en la identificación de los sitios vulnerables por mala calidad del agua y actividades antropogénicas inadecuadas. Es decir, se utilizó un enfoque de análisis de decisiones multicriterio, con SIG (GIS-MCDM), basado en la información disponible de múltiples fuentes, para abordar la necesidad de mapear el deterioro, a través de los distintos factores, y cubriendo una gran área geográfica (Figura 17).

Para lograr esto, los datos obtenidos mediante sensores remotos se presentan como datos digitales en formato ráster, mientras que la información física se deberá transformar en información vectorial georreferenciada. (Faisal, K. Sustainability 2017, 9, 380).

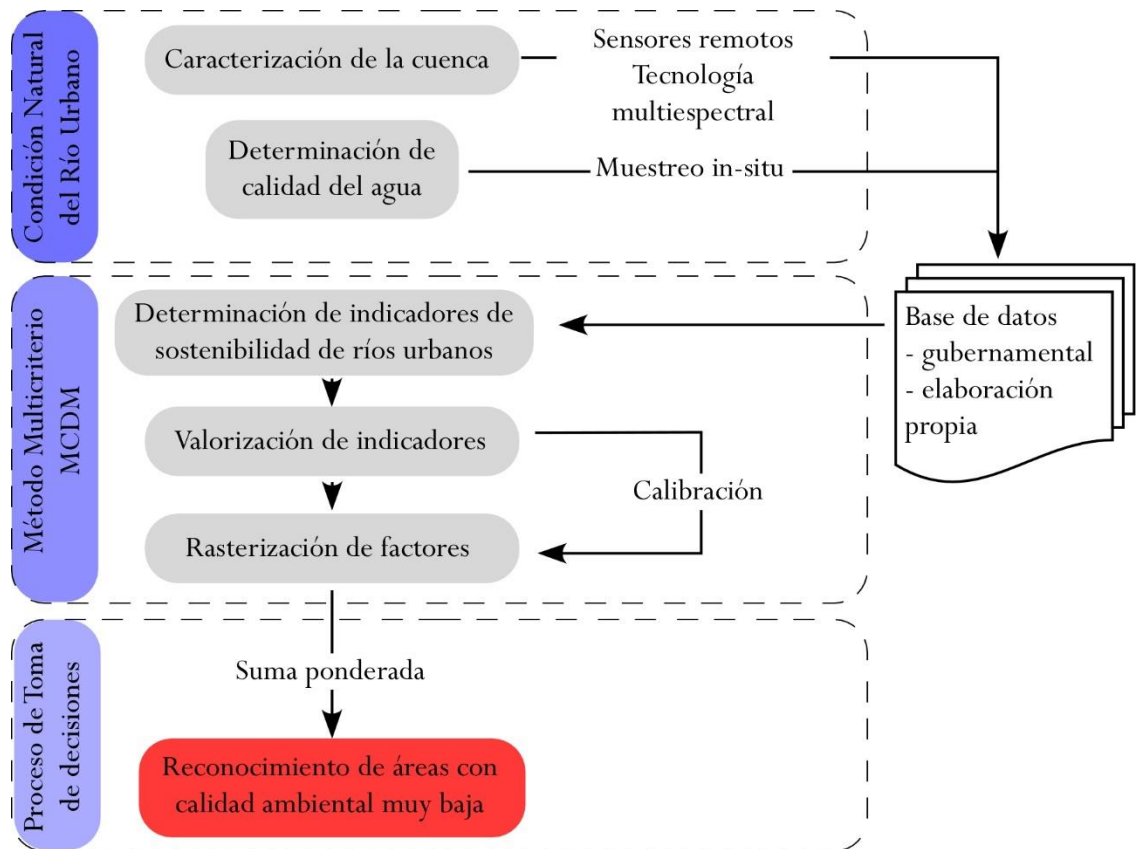


Figura 17. Diagrama de flujo de la aplicación del Método Multicriterio (MCDM) para el reconocimiento de áreas con muy baja calidad ambiental.

Los factores ponderados en el modelo multicriterio son factores antropogénicos, ambientales y factores naturales, como la topografía y la hidrología. Entre los indicadores considerados para cada uno de los factores se encuentran la calidad de la vegetación, la calidad del agua, las condiciones hidrológicas y el uso de suelo de la cuenca a la cual pertenece el área de interés de este estudio, entre otros (véase la Tabla 4).

Tabla 4. Tabla de Factores considerados para el Análisis Multicriterio de calidad de ríos urbanos.

TIPO	Factores	Valor	Indicadores	Valor
VARIABLE	ANTRÓPICOS	35	Puntos de descargas	4
			Tiraderos Irregulares	4
			Asentamientos Humanos Irregulares	5

VARIABLE	AMBIENTALES	30	Uso de suelo (Sentinel2) <ul style="list-style-type: none"> -agricultura 5 - urbanización de vivienda 4 - industria 3 - Vegetación 2 - Suelo desnudo 1 Calidad de la vegetación <ul style="list-style-type: none"> -Excelente calidad 2 -Buena Calidad 3 -Calidad media 4 -No vegetación 5 Calidad del agua <ul style="list-style-type: none"> - Excelente 2 - Buena Calidad 2 - Aceptable 3 - Contaminada 5 - Fuertemente Contaminada 5
CONSTANTE	TOPOGRÁFICOS	10	Pendiente en cauce <ul style="list-style-type: none"> • 0 5 • 0.0 – 2.86 4 • 2.87 – 4.52 3 • 4.53 – 6.05 1 • 6.06 – 15.91 1
VARIABLE	HIDROLÓGICO	25	Escurrimientos (Aportes) <ul style="list-style-type: none"> • Natural 2 • Canalizado 4

2.4.4 Valorización de los factores

Se generaron mapas individuales de los factores de análisis multicriterio, con sus clases apropiadas, las áreas cuantificadas y más información relevante para la comprensión de

las características que condicionan la calidad ambiental, como se presenta en los subtemas siguientes.

Debido a la gran variedad de tipos y medidas de criterios que se evalúan para una evaluación utilizando MCDM se requiere transformar estos diferentes tipos de valor / unidad en unidades conmensurables.

La transformación de los criterios de evaluación en bruto en unidades de valor proporcionales se denomina estandarización o escala de valor. Las escalas de los criterios múltiples y variados deben transformarse en una escala antes que se puedan manipular los datos. Dependiendo de los tipos de mapas de criterios que se analicen, hay varias formas de llegar a los criterios estandarizados.

La escala utilizada para la valorización de los factores, tanto variables como constantes, está fundamentada en los valores de calidad del agua, ya que éste es el factor que se encuentra normado por un organismo oficial. La escala crece del 1 al 5, teniendo el número 1 como mejor calidad y el número 5 como la peor calidad, en términos ambientales. En la Tabla 5 se desglosa la descripción de cada uno de los valores correspondientes a la Escala de Calidad Ambiental (ECA).

Tabla 5. Descripción de la Escala de Calidad Ambiental (ECA) utilizada para valorizar cada uno de los factores del modelo multicriterio.

Escala Calidad Ambiental		Descripción
1	Excelente	Se observa equilibrio en las condiciones ambientales, la resiliencia del factor es suficiente para la mitigación de impactos.
2	Buena	Condiciones físico-naturales de estabilidad ambiental, cuenta con susceptibilidad a la degradación ambiental.
3	Aceptable	Factores en transición de condiciones ambientales bajas a las altas. Tiene una resistencia moderada a la degradación ambiental. Factores que merecen una atención relativa en términos de manejo adecuado.

4	Mala	Factores que implican una degradación ambiental y alta sensibilidad a perturbaciones. Recursos naturales comprometidos.
5	Muy mala	Factores que representan impactos ambientales graves. Susceptibilidad extrema a degradación ambiental. Afectan a otros factores involucrados.

2.5 Validación de imágenes Sentinel mediante VANT

Para calibrar las imágenes de Sentinel 2 con la información captada por los VANT y la cámara multiespectral Parrot se utilizó una variante del método planteado por Pla et al., 2019. De esta manera se busca contrastar los datos generados por el satélite Sentinel 2 y la información obtenida en campo.

Las imágenes multiespectrales de la cámara Parrot proporcionan 6 áreas de interés (AI), captadas con alta resolución y que serán utilizadas para la calibración, como base de información verdadera. Cada una de las cinco AI están representadas por las áreas de muestreo in situ de agua y son áreas en las que se tiene registro de problemas ambientales.

Para evaluar la coincidencia entre imágenes de VANT e imágenes de satélite, primero se creó una red de puntos de 50 x 50 m, teniendo en cuenta que la resolución de Sentinel es de 10 metros y con el fin de obtener muestras representativas de los valores de índice de vegetación, tanto NDVI como GNDVI.

Posteriormente se extraen los valores de NDVI y GNDVI para cada una de las AI y se realiza una comparación entre las respuestas espectrales de Sentinel y los datos extraídos de los ortomosaicos.

Para el análisis de valores creados por los índices de vegetación se plantea el uso de herramientas estadísticas como las gráficas de dispersión con línea de tendencia R^2 .

La comparación entre NDVI y GNDVI se realiza para un polígono de 2 km formado a partir de un “buffer” de estas dimensiones a lo largo de la zona de inundación del área de estudio.

2.6 Insumos

2.6.1 Factores antrópicos

Asentamiento Irregulares

La capa de información que contiene los asentamientos considerados irregulares se formuló a partir de fotointerpretación y tomando como base los polígonos de manzanas disponibles a través del portal de datos libres del INEGI y los cuales pertenecen a la información recolectada en el censo del año 2020.

Los polígonos elegidos para la representación de asentamientos irregulares se determinaron haciendo uso del polígono definido para el área de inundación de la cuenca. De esta manera las manzanas que limitan con el cauce del río Pesquería se consideran como asentamiento irregular, debido a que no respetan la distancia que se debe mantener según lo establecido en las leyes mexicanas.

Los atributos contenidos en dicha capa de información fueron utilizados para determinar el valor de cada polígono, para finalmente rasterizar la información. Dentro de la clasificación de los polígonos por “ámbito” se les otorgó un valor de 5 a los polígonos urbanos y un valor de 3 a los definidos como rurales. Dichos valores se otorgaron considerando que los polígonos clasificados como urbanos por el INEGI se debe a que cuentan con redes de servicios esenciales; entre ellos, la conexión al drenaje municipal.

FID	Shape *	CVEGEO	CVE_ENT	CVE_MUN	CVE_LOC	CVE_AGEB	CVE_MZA	AMBITO	TIPOMZA
15	Polygon	1900601332522021	19	006	0133	2522	021	Urbana	3
16	Polygon	1900601332522019	19	006	0133	2522	019	Urbana	3
17	Polygon	1900601332522036	19	006	0133	2522	036	Urbana	3
18	Polygon	1900601332522023	19	006	0133	2522	023	Urbana	3
19	Polygon	1900601332556034	19	006	0133	2556	034	Urbana	3
20	Polygon	1900601332556003	19	006	0133	2556	003	Urbana	3
21	Polygon	1900601332522018	19	006	0133	2522	018	Urbana	3
22	Polygon	1900601332522017	19	006	0133	2522	017	Urbana	3
23	Polygon	1900601332522016	19	006	0133	2522	016	Urbana	3
24	Polygon	1900601332522002	19	006	0133	2522	002	Urbana	3
25	Polygon	1900600011223001	19	006	0001	1223	001	Urbana	3
26	Polygon	1900600010117055	19	006	0001	0117	055	Urbana	3
27	Polygon	1900600010850002	19	006	0001	0850	002	Urbana	3
28	Polygon	1900600010831054	19	006	0001	0831	054	Urbana	3
29	Polygon	1900600010831053	19	006	0001	0831	053	Urbana	3
30	Polygon	1900600010831008	19	006	0001	0831	008	Urbana	3
31	Polygon	1900600050634023	19	006	0005	0634	023	Rural	5
32	Polygon	1900600050634043	19	006	0005	0634	043	Rural	5
33	Polygon	1900600010865002	19	006	0001	0865	002	Urbana	3
34	Polygon	1900600010865001	19	006	0001	0865	001	Urbana	3

Figura 18. Tabla de atributos perteneciente a la capa de información en formato “shape” de los asentamientos reconocidos como irregulares para la zona del río Pesquería. Datos obtenidos por el INEGI, (2020).

Puntos de descarga

Con ayuda de algunas herramientas, como la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) de CONAGUA y aunado a la fotointerpretación de imágenes satelitales a través de Google Earth, se identificaron 25 puntos de descarga en el río Pesquería (ver Tabla 6). Estos puntos corresponden, en su mayoría, a canales pluviales que descargan directamente al cauce del río, sin ningún tipo de medida precautoria para evitar la contaminación del río.

Tabla 6. Coordenadas geográficas UTM de los puntos de descarga identificados en el Río Pesquería

Puntos de descarga Rio Pesquería		
Nombre (ID)	Coordenada X	Coordenada Y
ArroyoApod	374194	2854600
d_vitro	345258	2852930
d_pluvialindustrial	365191	2855530
d_arroyoencinas	370463	2854220
D_PTARNorte	371116	2854380
D_Aztlan	361102	2854100
d_pluvialgarcia	343731	2854180
d_drenajesub	358089	2853100

d_pluvialmitras	358063	2853120
d_naturallibram	356889	2853270
d_pluvialsanjose	353805	2853980
d_pluvialvallelincoln	350033	2852910
d_pluvialArbSantaRosa	375390	2855120
d_canalTopoChico	383405	2856180
d_REPDA	365923	2855720
d_REPDAmision	375150	2854610
d_REPDAgolf	388955	2854330
d_REPDapesq	395823	2851990
d_REPDapes2	395439	2851920
d_REPDapesq1	393919	2851980
d_REPDAGar	340416	2854910
d_REPDAPLUV	340897	2854940
D_PLUVIAL	336358	2855140
D_PLUVIALCONAG	372037	2854300
D_PLUVIALCONAG	372845	2854600

Plantas de tratamiento (PTAR)

Para categorizar con un valor ambiental a las plantas de tratamiento con descarga en el río Pesquería se utilizó la clasificación del SINA para caudal tratado, debido a que este valor indica la proporción de agua tratada que se aporta al río (Tabla 7). Dado que las normativas mexicanas únicamente proporcionan los límites permisibles de aportes a aguas nacionales, los límites permisibles no se adaptan a la cantidad total de descargas. Por eso la acumulación de estas se considera una alteración en el ecosistema y un factor de degradación ambiental.

Tabla 7. Valor de calidad ambiental según el caudal de agua tratado por PTAR

Caudal tratado	Valor ambiental
5.01 a 10	3
10.01 a 100	3
100.01 a 500	4
500.01 a 1000	5
Mayor a 1000	5

2.6.1 Factores ambientales

2.6.1.1 Uso del suelo

Clasificación supervisada

La clasificación de máxima similitud (MLC) se basa en dos principios para su funcionamiento. El primero considerando las celdas en cada muestra de clases del espacio que se distribuyen normalmente y el segundo adaptando el teorema de Bayes para la toma de decisiones. La herramienta utiliza datos estadísticos como las varianzas y covarianzas de las firmas de clases, cuando asigna cada celda a una de las clases representadas en el archivo de firma. Si se asume que la distribución de una muestra de clases es normal, una clase puede estar caracterizada por el vector del valor medio y la matriz de covarianza. Dadas estas dos características para cada valor de celda, se calcula la probabilidad estadística para cada clase, a fin de determinar la pertenencia de las celdas a la clase (ArcMap 10.3).

Las clases utilizadas para la clasificación de imágenes fueron definidas para la caracterización de la zona en cuanto a uso del suelo. Dichas clases son descritas en la Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación de uso de suelo, con áreas resultantes para cada clase.

Clase	Descripción	Área (Ha)
Vivienda	Casas	7584.109
Industrial	Naves industriales, patios transportistas	1106.248
Suelo desnudo	Suelo sin vegetación, predios.	58706.060
Vegetación	Áreas verdes y vegetación riparia.	22371.669
Agricultura	Zonas destinadas a uso de suelo agrícola.	1461.168

Clasificación no supervisada

En la clasificación no supervisada de imágenes multiespectrales el ISODATA (Datos auto asociados iterativamente) ha resultado uno de los algoritmos más funcionales para delimitar los valores homogéneos dentro de una imagen (Duda y Hart, 1973). Éste calcula los promedios de las clases o agrupaciones que eventualmente están distribuidos en el espacio de decisión.

La clasificación en dicho método de ISODATA se realiza mediante la técnica de agrupamiento “clustering”, la cual segmenta la imagen en clases desconocidas que posteriormente serán etiquetadas. Ésta se emplea en diversos métodos, como, por ejemplo: K-medias, C-medias e ISODATA (Richards, 1995).

Este tipo de clasificación se utilizó para la generación de imágenes de calidad de vegetación; en este caso, aplicando la fórmula de índice de vegetación NDVI y GNDVI para posteriormente clasificarlas. Los índices fueron clasificados en cinco categorías, utilizando primero el método de optimización de Jenks (Chen et al., 2013; Malik et al., 2020), también llamado método de clasificación de cortes naturales. Posteriormente, con el fin de optimizar la clasificación de los resultados para su posterior ponderación se utilizó el método de intervalos iguales y, finalmente la transcripción manual del intervalo para cada clase (Tabla 9), permitiendo unificar el intervalo de resultados para todos los sitios en estudio.

Tabla 9. Tabla de intervalos de clase, para índices de vegetación.

Clase	Intervalo
Excelente	0.6 – 1
Buena Calidad	0.4 – 0.6
Normal	- 0.4 – 0.4
Deficiente	-0.2 – - 0.4
Mala Calidad	0 – -0.2

2.6.1.2 Calidad del agua

Método para rasterizar resultados de calidad del agua

Se requiere obtener áreas representativas de los puntos de muestreo, con sus respectivos resultados. Para ello fue necesaria la creación de áreas de influencia. Se propone rasterizar la información mediante el método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW por sus siglas en inglés). Éste es un interpolador determinista rápido que es exacto. Hay muy pocas decisiones que tomar con respecto a los parámetros del modelo, sin embargo, no hay una evaluación de los errores de predicción.

El IDW (Ecuación 1) asume que cada punto medido tiene una influencia local que disminuye con la distancia. Da mayores pesos a los puntos más cercanos a la ubicación de predicción, y los pesos disminuyen en función de la distancia; de ahí el nombre de distancia inversa ponderada (ArcMap, 10.3). Esta característica de creación de “buffers” de predicción beneficia a la distribución de los valores de calidad del agua en el río.

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

$Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i

λ_i = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i

s_0 = la ubicación de la predicción

N = la cantidad de valores medidos

2.6.1.3 Índices de vegetación

El estado de la vegetación del río Pesquería fue evaluado mediante respuestas espectrales obtenidas a partir de ortomosaicos producto de las fotografías multiespectrales previamente procesadas, obtenidas con VANT e imágenes multiespectrales generadas por el satélite Sentinel 2.

La calidad de vegetación (CV) se determina con base en los resultados obtenidos por los índices de vegetación NDVI y GNDVI. Debido a la naturaleza de la cámara Parrot, la georreferenciación de los ortomosaicos multiespectrales se realizó de manera manual, creando puntos de referencia en los ortomosaicos RGB, para así lograr una superposición de ambos.

Análisis espacial mediante índices de reflectancia

Para la interpretación de las condiciones vegetativas del área de interés se emplearon fórmulas preestablecidas a las bandas disponibles, con el fin de obtener una banda índice resultante la cual resalta características específicas.

NDVI

El índice diferencial normalizado de vegetación (NDVI) se define como el ratio de dos longitudes de onda electromagnéticas. Conforme la capacidad fotosintética de la vegetación se incrementa, mayor es la absorción de luz roja visible, debido al aumento de clorofila en las partes superficiales de la vegetación, y se dispersa más luz infrarroja cercana debido a la alineación de las paredes celulares (Myneni et al., 1995). Esta relación hace que el NDVI sea un buen indicador de la capacidad fotosintética. Por lo tanto, el NDVI (Ecuación 2) se considera un indicador eficiente del estado de crecimiento de la cobertura verde y la vegetación (J. Gao et al., 2012; Kooistra et al., 2004).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde NIR representa la Banda de Infrarrojo Cercano, RED la Banda Roja.

Un hecho importante sobre los valores obtenidos es que, para una imagen NDVI dada, el valor de píxel NDVI resultante siempre varía de -1 a +1. También es importante señalar que las áreas que carecen de vegetación dan un valor negativo o un valor cercano a cero. En palabras simples, un número negativo o un número cercano a cero significa que no hay vegetación y un número cercano a +1 (0.8 - 0.7) representa una vegetación bien designada. El NDVI puede servir como indicador de muchos parámetros fisiológicos y ecológicos y puede ayudar a sacar conclusiones sobre la superficie, la vegetación, el albedo y la actividad fotosintética (Kinthada, 2014).

Para un análisis completo, se consideran también los factores externos que influyen directamente a los valores resultantes de NDVI, como la elevación, la precipitación y el tipo de suelo (J. Gao et al., 2012; Yuan et al., 2019). El intervalo de valores de NDVI para la clasificación de la vegetación varía, dependiendo del sitio de estudio; por lo que es

importante que, al crear una escala de salud vegetativa, la clasificación de éstos se realice dependiendo de los resultados obtenidos.

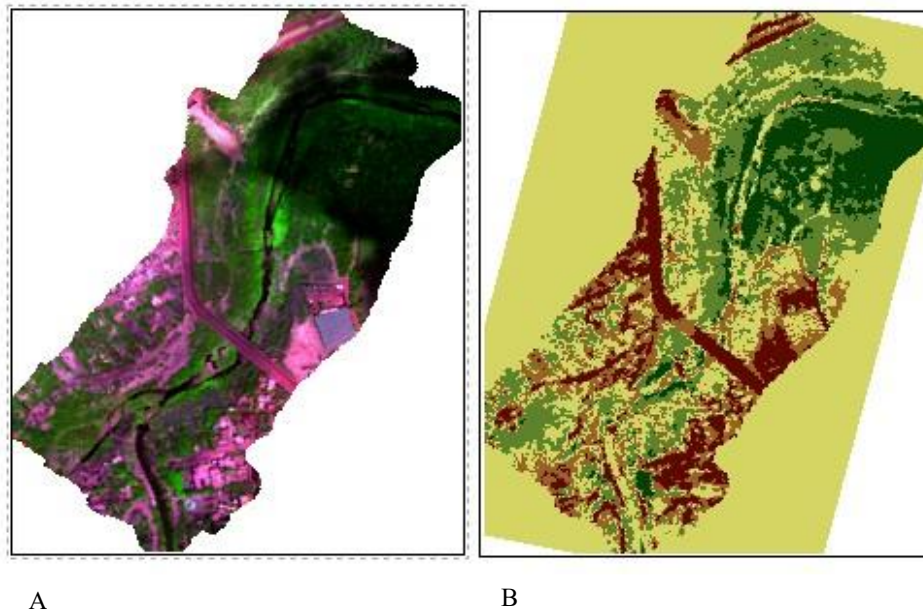


Figura 19. Ortomosaico multiespectral perteneciente al vuelo EP01_2 (A) y su resultado del cálculo de NDVI (B).

GNDVI

Éste aporta información acerca de la actividad fotosintética de la planta, pudiendo establecer así parámetros como el consumo de agua y la cantidad de nitrógeno de la vegetación (Kharuf, Orozco, Díaz, & Pineda, 2018). Este índice se calcula a partir de las bandas de infrarrojo cercano (NIR) y verde (GREEN), determinado por la siguiente formula:

$$GNDVI = \frac{NIR - BGreen}{NIR + BGreen} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde, NIR representa la Banda de infrarrojo cercano y BGreen la banda verde.

Cabe mencionar que este índice se considera para la vegetación elevada por su gran sensibilidad en este tipo de cultivos, donde los resultados van de -1 a 1. Los valores negativos se consideran cuerpos de agua o suelo descubierto.

Los ortomosaicos multiespectrales georreferenciados permitirán obtener los valores de NDVI y GNDVI (ecuación 3), con un análisis de mayor escala y con una ubicación

espacial correcta, que permitirá realizar correlaciones sobre la calidad ambiental en la vegetación y la calidad del agua en los distintos puntos del área de estudio.

Para el análisis de vegetación a escala satelital se utilizó la imagen S2A_tile_20190808_14RLP_0_R10B04.TIF, correspondiente a la fecha 08 de agosto de 2019. Dicha imagen contaba con menos del 5% de nubosidad, a diferencia de las otras imágenes disponibles, en el intervalo de fechas en que se realizó el muestreo.

Reclasificación de valores

Con el fin de otorgar uniformidad a los valores obtenidos de cada uno de los índices espectrales, se realizó una reclasificación con ayuda de una herramienta SIG.

Inicialmente los valores registrados de reflectancia, utilizando las fórmulas de índices de vegetación, se clasifican mediante el método de Jenks. En este método las clases se basan en las agrupaciones naturales en clases, dependiendo de la “mejor agrupación” de valores similares y una maximización de las diferencias entre las clases. Los límites entre las clases se establecen en donde se encuentra una mayor diferencia entre los datos. (ArcMap 10.3). Los cortes naturales son clasificaciones específicas de los datos y no sirven para comparar varios mapas creados a partir de información subyacente distinta.

El método utilizado para la reclasificación fue el de intervalos iguales. Este método divide los valores de los atributos en intervalos de tamaños iguales (Tabla 10). Esto quiere decir que el número de datos que se registran en cada clase será diferente. La división de las clases se crea completamente dependiendo de los valores mínimos y máximos registrados.

Tabla 10. Valores de reclasificación, para índices de vegetación

Valores de reclasificación
0.6 – 1
0.2 – 0.6
-0.2 – 0.2
-0.6 - -0.2
-1 - -0.6

Los valores fueron ordenados en 5 clases iguales/equivalentes, las cuales permitirán clasificar el sitio considerando su calidad vegetativa, teniendo la clase 1 como la de mejor calidad y la clase 5 como la de menor calidad o más degradada en cuestión de vegetación.

Los resultados obtenidos en cada uno de los índices se correlacionan con las condiciones reales visibles de campo de los sitios de interés. Así mismo, al realizar la superposición de estas capas de información con los resultados de DQO se puede inferir una correspondencia entre la calidad del agua y la calidad de la vegetación.

El área correspondiente a las clases 1 y 2, atribuidas a la vegetación saludable, resulta predominante en todos los sitios de estudio, mientras que, las clases 3, 4 y 5 identifican el área correspondiente a suelo desnudo, otorgando una mejor perspectiva en cuando al uso de suelo, áreas con sedimentos trasportables y algunos montículos de residuos sólidos.

2.6.2 Factores topográficos

El análisis de los factores topográficos es esencial para la caracterización de la cuenca. Éste es fundamental para crear un terreno común de conocimiento y promover la aplicación exitosa de la gestión.

Para obtener los valores de pendiente de la cuenca en estudio se utilizó el Modelo de Elevación Digital (DEM) de mayor accesibilidad y resolución en México. El Continuo de Elevación Mexicano (CEM) en escala de 5 m de resolución de libre acceso que pone a disposición el INEGI, el cual fue procesado y posteriormente reclasificado para ser integrado en el modelo.

El mapa de pendientes se elaboró a partir de un modelo digital de terreno, a través del módulo Spatial Analyst Tools> Surface> Slope de ArcGis. El cálculo de la pendiente se basa en el análisis del máximo cambio de elevación entre una celda central con ocho celdas vecinas, en un arreglo de 3 x 3 celdas, considerando la celda central.

Una vez calculados los valores de cambio de pendiente en la cuenca se procedió a aplicar un método para obtener únicamente valores significativos del cambio de pendiente en el cauce del río, esto con motivo de tener valores de cambio de pendiente correlacionables con el comportamiento del flujo del río (ver Figura 20).

Utilizando el mismo MDE de 5 metros fue posible obtener las curvas de nivel del río Pesquería a 1 metro. Se creó un “buffer” de 200 metros a lo largo del cauce para este procedimiento y con motivo de obtener valores topográficos más certeros para el área de la riviéra, se corrió el proceso de cálculo de pendiente nuevamente. Se extrajeron los valores de pendiente mediante la creación de puntos sobre el cauce principal, en intervalos de 10 metros y la herramienta de Spatial Analyst > Extract Multivalue to Points. Dichos puntos fueron proyectados en “buffers” de 10 metros, para completar el total del cauce del río (ver Figura 20B).

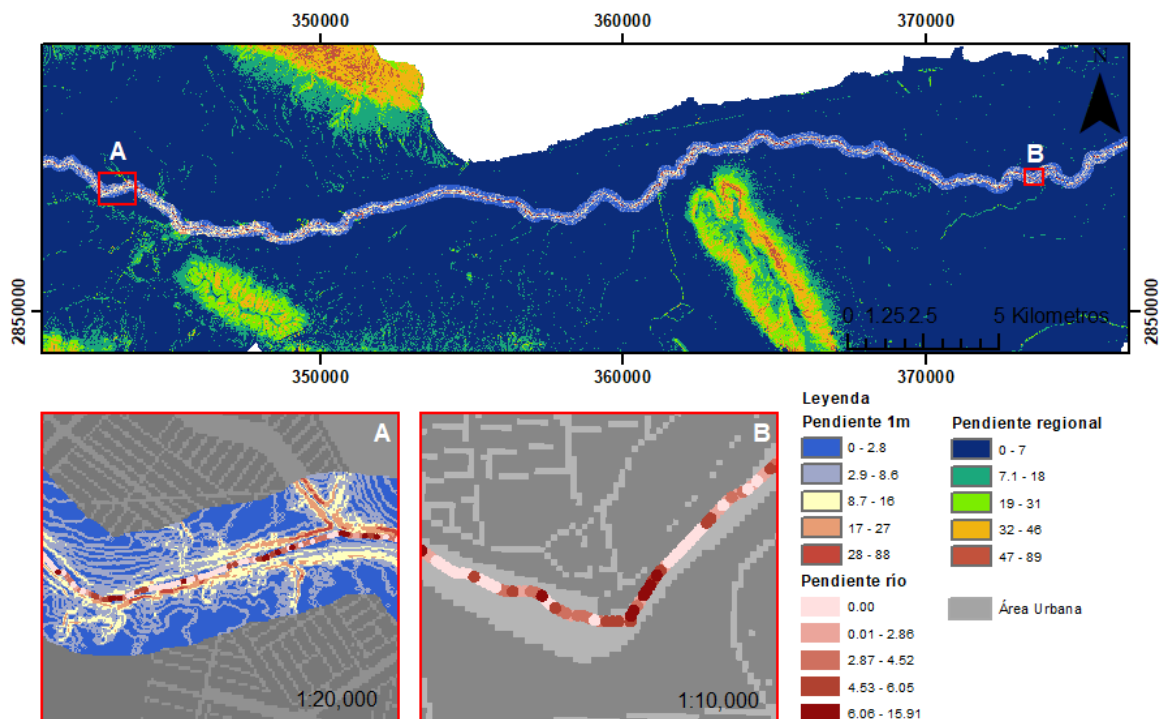


Figura 20. Resultados de análisis de pendientes en el nivel regional, con escala 5m, a 1 m (A) y análisis de pendientes en el cauce (B).

Los valores de pendiente fueron reclasificados en 5 clases, utilizando el método de Cuantil, en la que cada clase contiene el mismo número de entidades.

2.6.3 Factores hidrológicos

Para la generación del modelo de altura (MDA) base utilizado para el análisis se utilizó un conjunto de “rasters” MDE, de superficie y de terreno, obtenidos de la base de datos de INEGI.

En el proceso de preparación del MDE se realizan tres pasos principales, que corresponden al relleno de depresiones, cálculo de la dirección de flujo y determinación de la acumulación de flujo (Jenson, S. K., and J. O. Domingue. 1988). Se comenzó relleno de las depresiones existentes en el “ráster” y, a continuación, se determinó la dirección que tomaría un hipotético flujo de agua a su paso por cada celda, aplicando el algoritmo incorporado en varios modelos hidrológicos y de parametrización de cuencas (Hernández Guzmán & Ruiz-Luna, 2018). A partir de que se establece la dirección de flujo, se calcula el flujo acumulado en cada celda. Este método considera el factor de mayor pendiente en una matriz de 3x3 celdas contiguas, determinando el número de celdas que fluyen hacia la celda central, por lo que los píxeles que se posicionen dentro de la ruta principal de flujo “acumularán” los píxeles que se encuentren en la misma ruta. Este método fue propuesto por Jenson y Domingue, 1988.

Con las definiciones de jerarquía fluvial se adoptó el método del sistema de clasificación introducido por Strahler (1952), que considera que los canales de primer orden son aquellos que no tienen afluentes; es decir, son canales de cabeceras de drenaje. Según el autor, la identificación comienza con los ríos de primer orden, que son los que no reciben afluentes. A partir de la confluencia de dos ríos de primer orden, se forma un segmento de segundo orden. La confluencia de dos ríos de segundo orden define un río de tercer orden y así sucesivamente. Cuando dos ríos de diferentes órdenes se unen, prevalece el orden superior.

Para los propósitos de este estudio, los escurrimientos considerados serán los de mayor orden, desde el orden cuatro al séptimo.

3 RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados de forma ordenada y relacionada con los criterios necesarios para la elaboración de una herramienta multicriterio base SIG para la caracterización del Río Pesquería. Se consideran resultados intermedios a las capas de información obtenidas del posprocesamiento, las cuales sirvieron para la caracterización del área de estudio, así como para alimentar al modelo multicriterio. Los asentamientos irregulares, descargas, PTAR, índices de vegetación, calidad del agua, uso de suelo y análisis hidrológico son los resultados intermedios, mientras que los resultados finales son el resultado generado por el proceso final del modelo multicriterio, que se presentan en el apartado 3.5.

3.1 Análisis de factores antrópicos

3.1.1 Asentamientos irregulares

La capa de asentamiento irregulares está conformada por los polígonos que se encuentran dentro o parcialmente dentro del polígono de área de inundación del río Pesquería. Dichos polígonos fueron posteriormente rasterizados a un tamaño de 10 m/px de resolución, para su posterior uso en el MCDM. En la Figura 21 se puede observar la localización de los polígonos, con respecto al cauce del río.

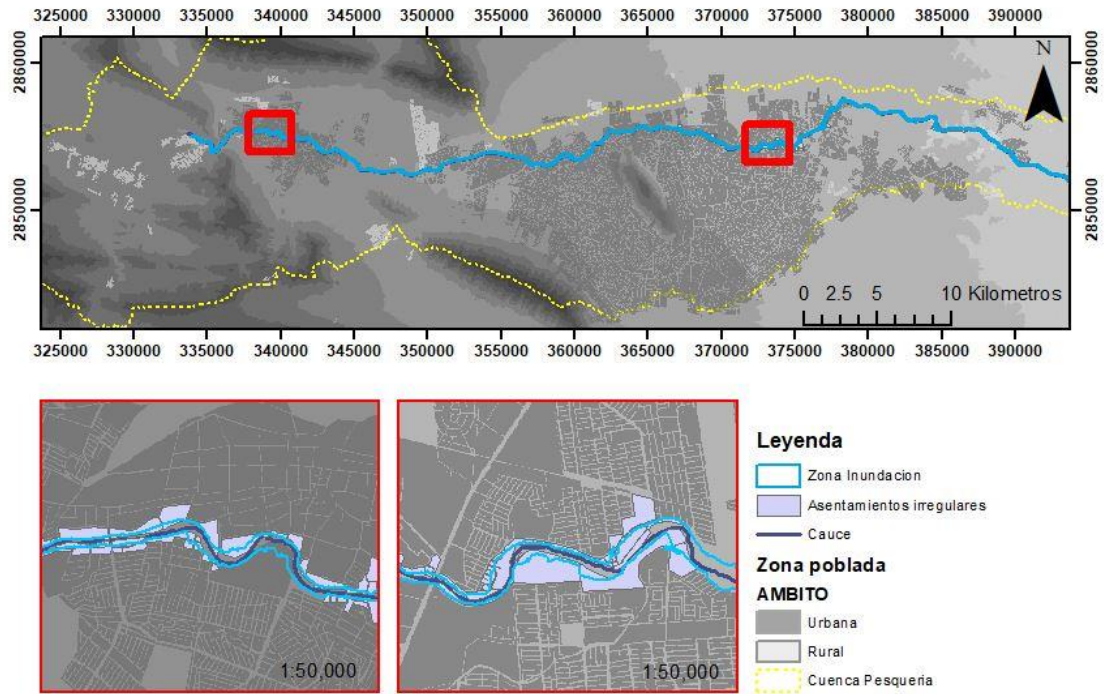


Figura 21. Plano de la capa rasterizada para los asentamientos irregulares delimitados por el área de inundación del río Pesquería.

3.1.2 Descargas y PTAR

La base de datos recopilada sobre las descargas y plantas de tratamiento (PTAR) fueron rasterizadas en el SIG para su posterior uso en el análisis multicriterio. Al ser puntos geográficos específicos se creó un “buffer” de 30 metros de influencia para cada uno de los datos. De esta manera se obtiene un área representativa para el modelo. En la Figura 22 se observa la capa previa a la rasterización en un formato vectorial, para su mejor apreciación.

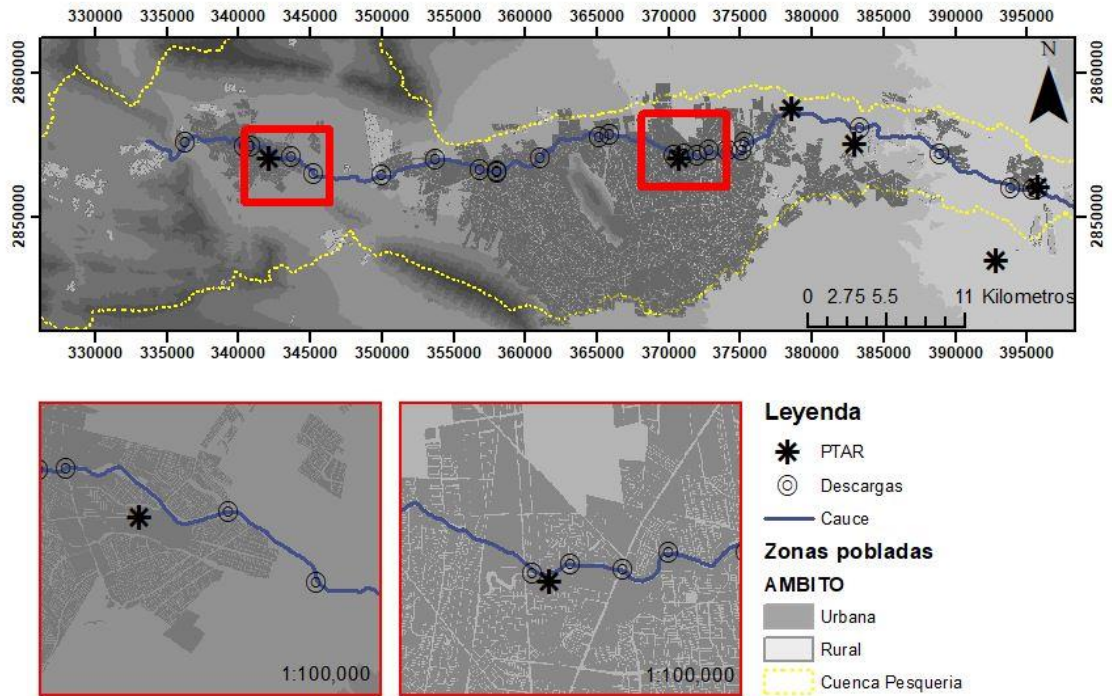


Figura 22. Resultado de la georreferenciación de los sitios identificados como descargas y las plantas de tratamiento localizadas con descarga al río en estudio.

3.2 Análisis de factores ambientales

3.2.1 Calidad del agua

Con la 1er. campaña de muestreo se determinó la Demanda Química de Oxígeno (DQO), obteniendo los resultados presentados en la Figura 23. Los resultados aquí mostrados corresponden a los límites municipales de los municipios de Escobedo (EP02), Monterrey (MEP01) y García (GP01). Los colores corresponden a la clasificación de calidad del agua, utilizada por la CONAGUA en el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA).

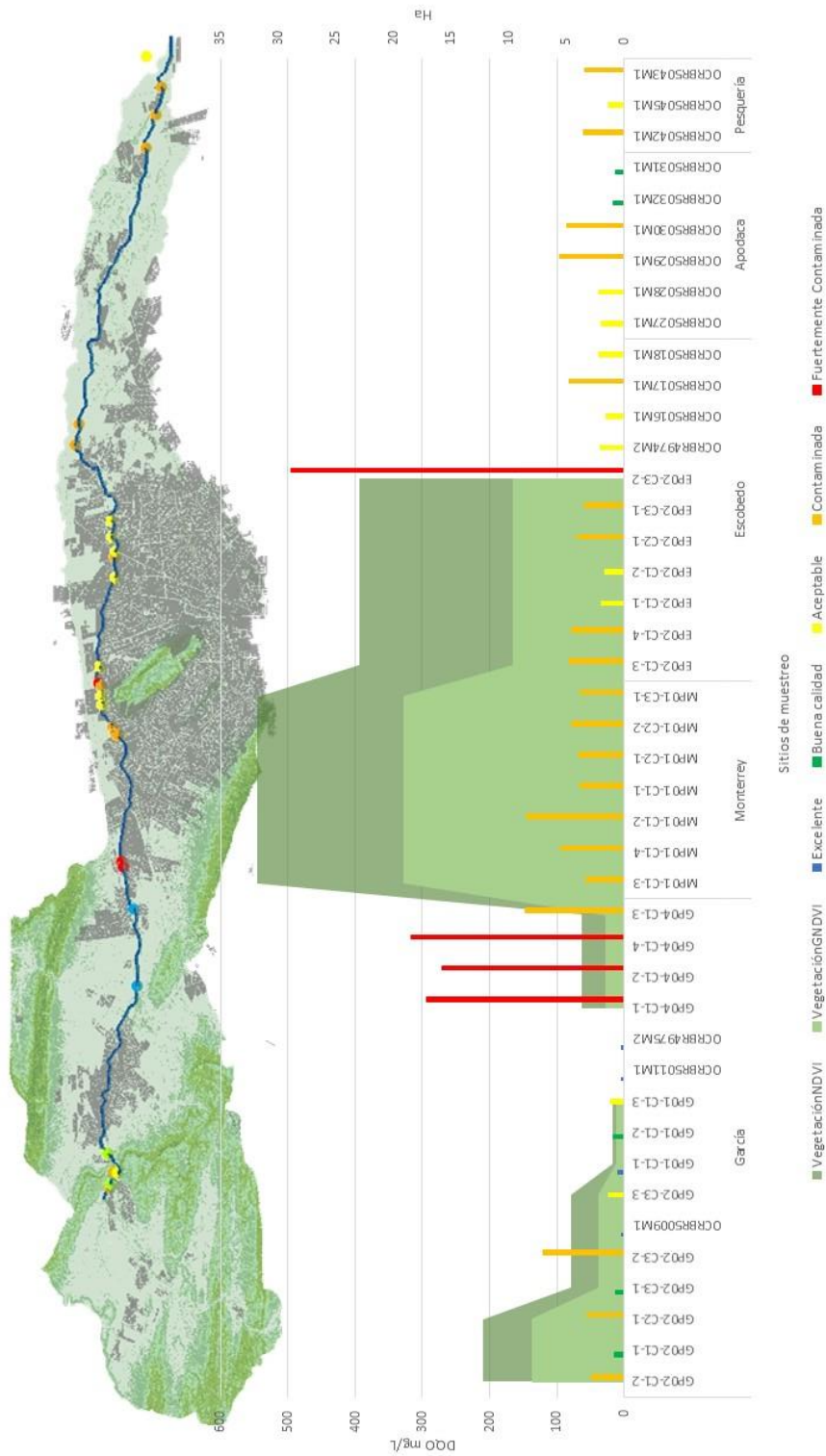


Figura 23. Resultado de DQO total obtenidos del análisis de muestras obtenidas en el río Pesquería en los municipios de Escobedo, Monterrey, y García. Rango de calidad del agua utilizado por CONAGUA.

Los resultados indican que la mayor parte de los sitios se encuentran clasificados como contaminados y fuertemente contaminados. Esto crea áreas de interés para la comparación de los índices de vegetación obtenidos por la cámara multiespectral y el DQO calculado en los sitios, profundizando en el estudio de las zonas y considerando, además, los factores antrópicos.

Los resultados obtenidos mediante el análisis espacial con índices de vegetación (NDVI Y GNDVI) se presentan en la Figura 23. Dicho cálculo se realizó en las zonas de muestreo, donde simultáneamente se obtuvieron las imágenes multiespectrales con VANT. La comparación entre la calidad de la vegetación y la calidad del agua se lleva a cabo considerando la presencia de área de vegetación riparia con características de verdor <0.6 en el índice de vegetación (NDVI Y GNDVI) esto debido a que, de acuerdo con la bibliografía, el NDVI representa un alto contenido de nitrógeno y clorofila, característico de la vegetación sana y joven, mientras que el índice GNDVI funciona para la detección de vegetación madura.

3.2.2 Validación de la calidad de vegetación mediante índices espectrales

El coeficiente de determinación R^2 de correlación entre los índices de vegetación NDVI y GNDVI de SENTINEL 2 se presentan en la Figura 24 de resultados. En particular, para las imágenes satelitales no se muestra una variación importante entre ambos resultados. Los valores comparados se concentran en un área definida de 2 km, partiendo del cauce del río.

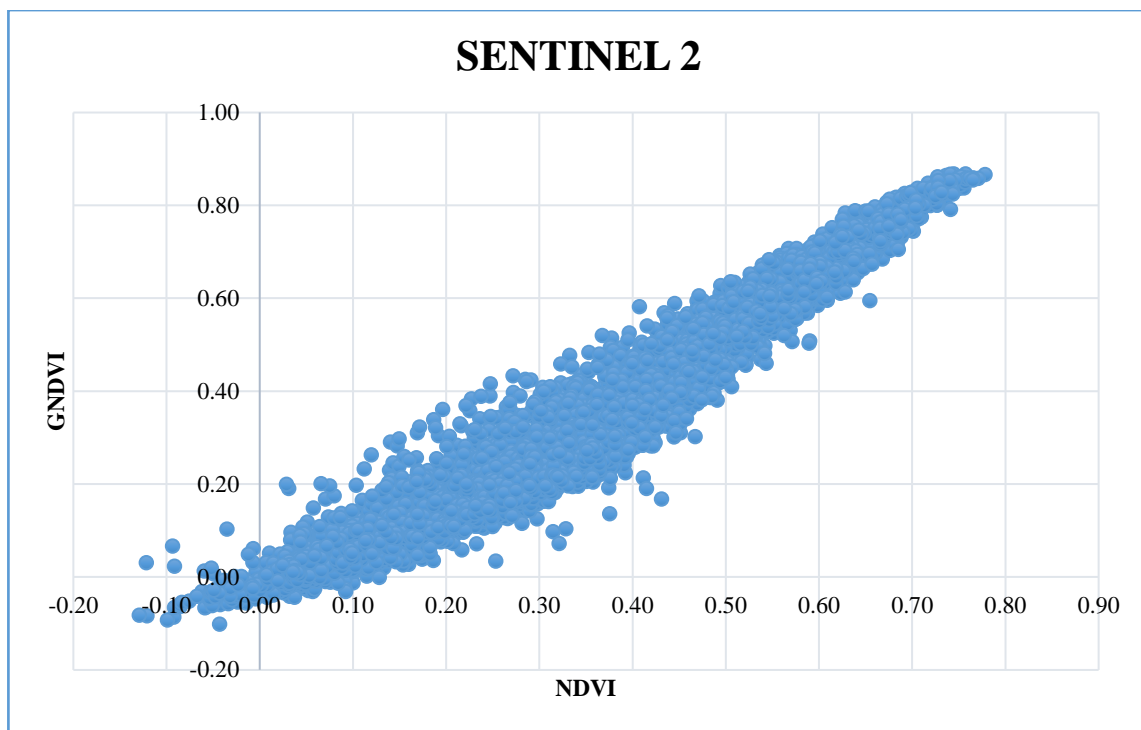


Figura 24. Gráfico de dispersión para los datos de GNDVI y NDVI obtenidos de la imagen multispectral de SENTINEL 2.

Además, se realizó la comparación entre los resultados obtenidos de la imagen satelital del día 8 de agosto de 2019, con el ortomosaico obtenido con VANT para la misma fecha. Esto para validar la correlación entre imágenes con distinta resolución.

En la Tabla 11 se puede notar el área de interés con mayor coincidencia en el análisis de regresión: es la GP02 que corresponde en la fecha de la imagen satelital y el levantamiento con VANT, para el día 08 de agosto de 2019.

Tabla 11. Resultados de correlación entre los valores de NDVI y GNDVI para imágenes Sentinel y VANT por AI.

Área de Interés	Fecha	NDVI (R ²)	GNDVI (R ²)
MEP01	25-07-19	0.4015	0.3335
EP02	30-07-19	0.4384	0.3539
GP04	01-08-19	0.5226	0.3847
GP01	06-08-19	0.4967	0.3184
GP02	08-08-19	0.5989	0.625
GP03	13-08-19	0.3521	0.2217

En las siguientes gráficas (Figura 25) se puede observar la correlación entre los índices de NDVI para Sentinel (s_gp02_3nd) y VANT (v_gp02_3nd), para el AOI localizado en el municipio de García.

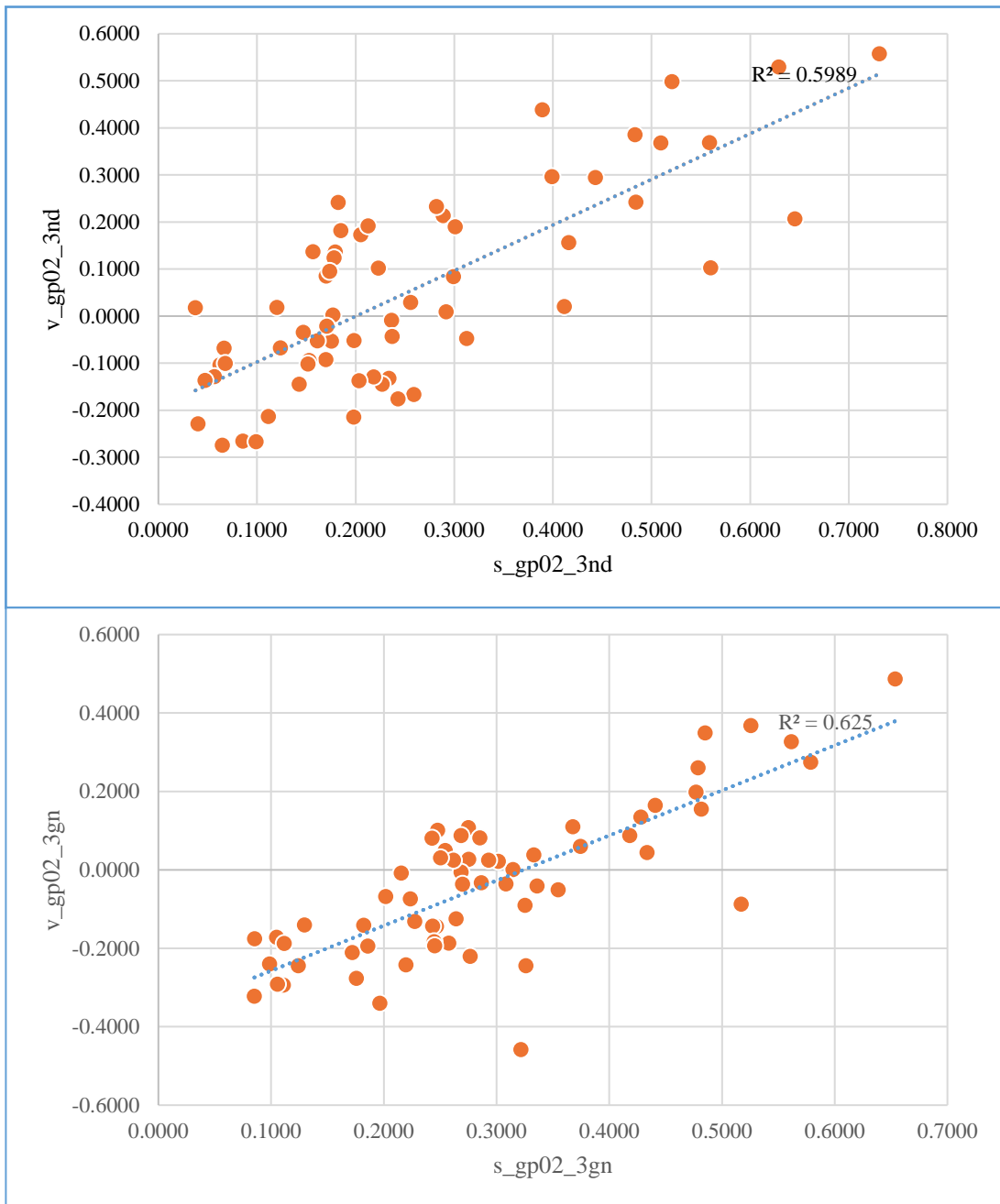


Figura 25. Gráficas de dispersión para los resultados de NDVI (superior) y GNDVI (inferior) obtenidos con SENTINEL y VANT para AOI GP02 correspondiente a la fecha 8 de agosto de 2019.

3.3 Uso del suelo

El uso de suelo representa uno de los factores determinantes, no sólo de contaminación, si no de riesgo debido a la urbanización creciente en el área de inundación del río Pesquería. Con el fin de enriquecer el modelo se utilizan dos tipos de insumos, con una resolución temporal y espacial distinta.

La clasificación regional (Tabla 12) de la cuenca sobre el uso de suelo corresponde a las imágenes satelitales de Sentinel 2 (Figura 26). Las áreas de entrenamiento y evaluación utilizadas en la clasificación se han definido mediante fotointerpretación sobre la imagen, considerando también la información aportada por la clasificación de NDVI para la identificación de la vegetación. Las áreas de entrenamiento se han definido de manera aleatoria en el área de estudio. Las clases consideradas son: agricultura, urbanización de vivienda, industria y vegetación.

Tabla 12. Clasificación de uso de suelo para la cuenca del río Pesquería.

Clase	Área (Ha)
1. Vegetación	22371.669
2. Vivienda	7584.109
3. Industrial	1106.248
4. Agricultura	1461.168
5. Suelo desnudo	58706.060

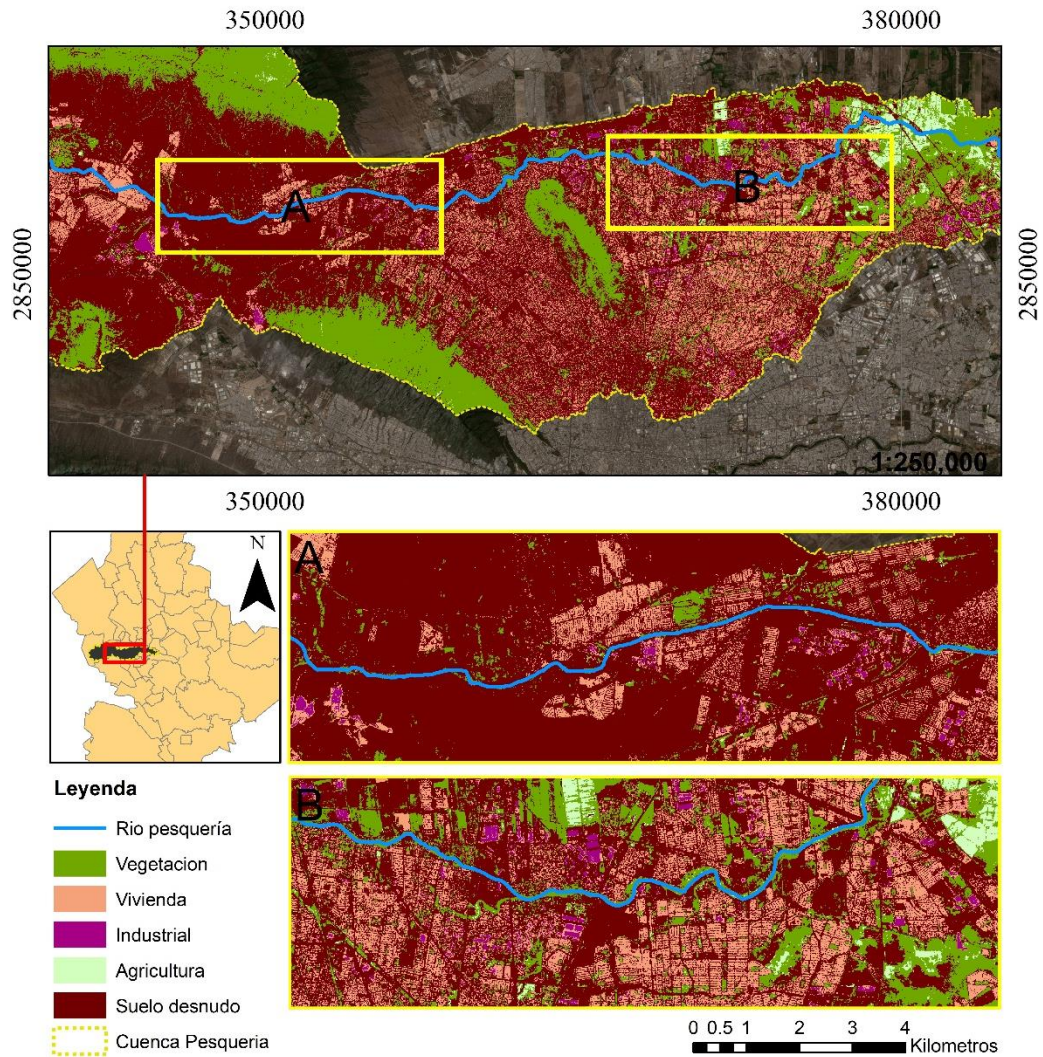


Figura 26. Clasificación de uso de suelo mediante imagen Sentinel 2. Elaboración propia, fecha de imagen satelital: 19 de julio de 2019.

Como se puede observar en la clasificación, se realizó una distinción entre la vegetación natural y el verdor provocado por actividades antropogénicas (agricultura).

Utilizando los ortomosaicos multispectrales obtenidos con VANT se pudo realizar una caracterización más específica sobre las actividades desarrolladas en las áreas de interés (AI).

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una de las AI (Tabla 13). Cada una de las descripciones fue realizada utilizando fotointerpretación de las imágenes obtenidas con dron, además se complementa con los resultados de la clasificación de calidad del agua obtenida por el análisis de DQO.

Tabla 13. Descripción de los sitios de muestreo en el río Pesquería y su clasificación de calidad del agua según los resultados del muestreo realizado por el IIC.

Sitio	Calidad del agua	Descripción
EP02-C3-1 EP02-C3-2	Contaminada Fuertemente Contaminada	Asentamientos irregulares en la parte norte del río y naves industriales en la parte sur. Las muestras fueron tomadas en una zona de estrangulamiento del río se observa un afloramiento de rocas calcáreas acumulación de residuos sólidos posiblemente de calidad industrial aguas arriba el estrangulamiento se debe a un cambio en la morfología del río aguas abajo se debe a la acumulación de residuos sólidos.
EP02-C2-1	Contaminada	Cambio de dirección por morfología se forma un pequeño meandro. Asentamientos irregulares al norte se encuentran distanciados por una diferencia de altura en las terrazas aluviales.
EP02-C1-4	Aceptable	El río tiene un flujo continuo, se observan asentamientos irregulares al norte irregulares al sur del río. En la parte sur una gran cantidad de vegetación se para las viviendas del cauce.
MEP01-C3 MEP01-C1	Contaminada	Zona meandrica del río. El flujo se reduce y se observa una gran cantidad de sedimentos finos en el cauce. Pocos asentamientos irregulares y algunas vías de transporte pavimentadas.
MEP-C1-3	Contaminada	Aporte de agua al río mediante drenaje urbano canalizado. Zona de estrangulamiento del río por sedimentos.
MEP01-C1-4 MEP01-C1-2 MEP01-C1-1	Contaminado	Asentamientos irregulares y regulares aguas arriba del sitio. Se observa escasa vegetación y una gran cantidad de residuos sólidos (material constructivo)

GP04-C1-3	Fuertemente Contaminado	Gran cantidad de vegetación riparia. Residuos sólidos urbanos visibles. Se observan algunas construcciones en el cauce del río como puentes de conexión entre ambos lados del cauce. Viviendas irregulares al Norte y asentamientos regulares al sur. Estrangulamiento del río, el flujo disminuye.
GP04-C1-1 GP04-C1-2	Fuertemente Contaminado	Viviendas regulares en el lado Norte y Sur del cauce. Aguas arriba se observa un patio de la industria de transporte y algunos fraccionamientos privados.
GP01-C1-3 GP01-C1-2 GP01-C1-1	Aceptable Buena Calidad Excelente	Pocos asentamientos irregulares, se observa un flujo continuo del río. Viviendas regulares se establecen a una distancia considerable del cauce. Gran extensión de suelo desnudo y vegetación. Aguas arriba no se observan asentamientos urbanos
GP02-C3-2	Contaminada	Estrangulación del río por pequeñas “represas” creadas de forma manual.
GP02-C3-3	Aceptable	Sitio con caminos de acceso al cauce a escasos metros y áreas con extensa vegetación.
GP02-C2-1	Buena Calidad	Área previa a zona de estrangulamiento por un ligero cambio en el relieve por afloramiento de rocas sedimentarias y sedimentos, además de poca vegetación.
GP02-C2-2	Contaminado	Vegetación riparia. Aguas arriba se observan algunos asentamientos irregulares, caminos de acceso al cauce del río.

3.4 Análisis hidrológico

El flujo del agua en la cuenca del río Pesquería es uno de los principales factores en la movilización de contaminantes: por ello, para este factor se realizó la reconstrucción de la red hidrográfica correspondiente a la subcuenca del río Pesquería.

Esta clasificación dio como resultado órdenes del 1 al 7 (obtenidos por el método de Strahler). Dichos valores que fueron reducidos para la categorización que finalmente resulto en tomar los afluentes con el orden del 4 al 7. El resultado de aplicar este método sobre el MDE de 5 metros se muestra en el mapa (ver Figura 27).

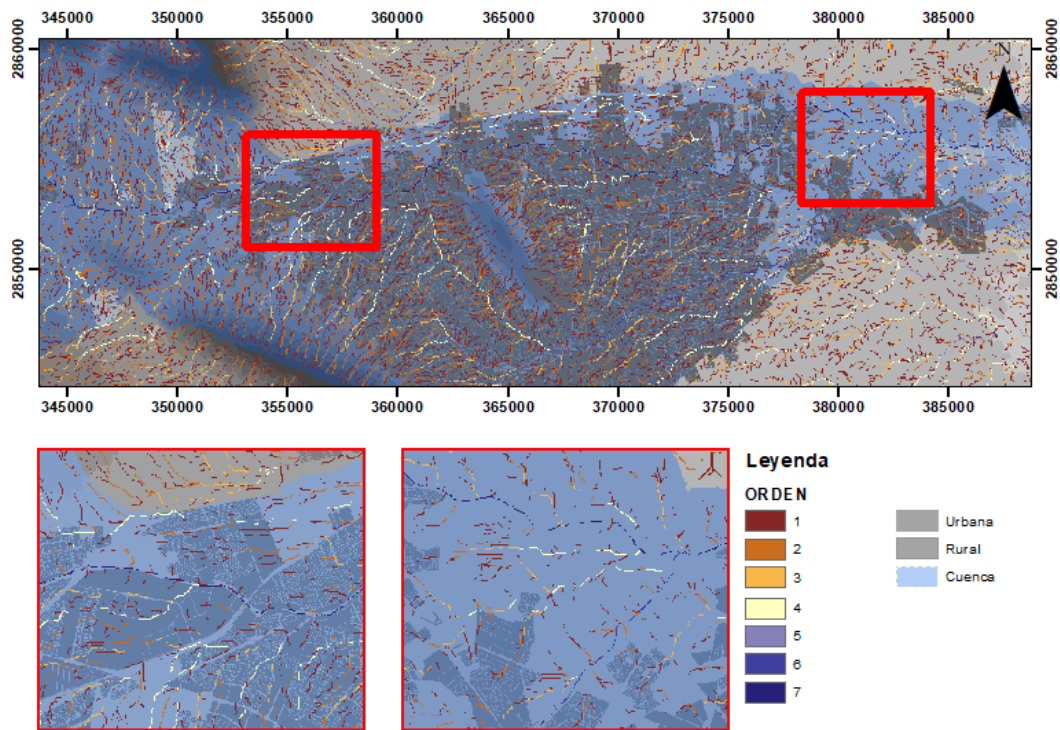


Figura 27. Resultado de orden hidrológico por el método de Strahler en la cuenca de estudio.

La caracterización de los principales afluentes de la cuenca permite tener en perspectiva las fuentes de contaminación dispersas que, a diferencia de las fuentes localizadas (tuberías, drenajes), se refiere a aquellas recogidas por escurrimientos, que se vierten de manera difusa desde zonas separadas entre sí y provienen de zonas geográficas más amplias y extendidas, como escurrimientos agrícolas, urbanos o suburbanos, de predios en construcción, derrames y descargas, incluyendo la contaminación del aire, que por medio de la precipitación suelen recoger contaminantes (Quiroz-Martínez y Rodríguez-

Castro 2006). Los escurrimientos fueron categorizados como naturales y canalizados (ver Figura 28).

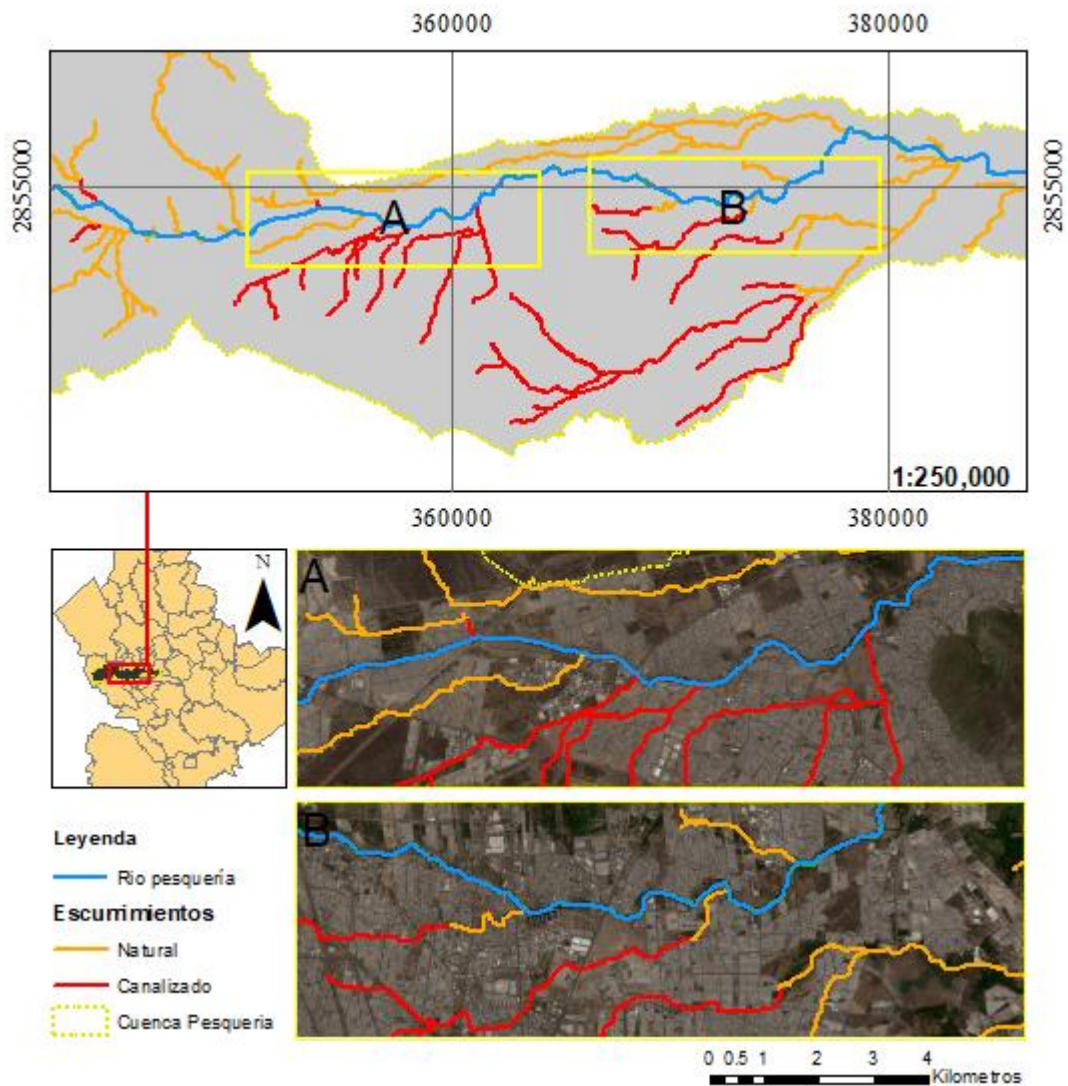


Figura 28. Resultados obtenidos de la clasificación de aportes hidrológicos al cauce del Río Pesquería

Se reconocieron 6 escurrimientos canalizados que desembocan en el río Pesquería sin ningún tipo de medida precautoria para evitar la descarga directa de contaminantes. Dichos escurrimientos fueron valorizados utilizando la escala establecida para calidad ambiental (ECA).

3.5 Modelo SIG

Como resultado se obtuvo un mapa de zonificación de calidad ambiental para el río urbano “Pesquería”. Los factores al finalmente considerados son de carácter antropogénico, ambiental, topográfico o hidrológicos.

Esta caracterización justifica el cambio de factores ambientales a considerar y el método por utilizar. El modelo metodológico implementado para clasificar el estado ambiental de distintas zonas del río Pesquería basa su proceso en técnicas multicriterio. Dicho modelo considera entre sus factores elementos relevantes, naturales y antrópicos, para la salud ambiental en ríos urbanos (Figura 29).

Para la conformación de este modelo se estableció un método funcional para la caracterización de ríos urbanos. Los insumos considerados para el modelo se seleccionaron a partir de la bibliografía consultada, sobre estudios de calidad ambiental para ríos urbanos.

Para uno de los modelos se definió un “buffer” de 2 kilómetros a lo largo del río, para el análisis mediante el método de suma ponderada habilitada en la caja de herramientas de ArcMAP (Figura 30). Ésta permite ponderar y combinar varias entradas para crear un análisis integrado. Para este método sí se otorgó una escala de valor por factor, además del valor unitario de cada una de las capas, ponderándose las capas de descargas y de asentamientos como factores antropogénicos con un valor de 35/100; capas de uso de suelo, calidad del agua y NDVI, como factores ambientales con un valor de 30/100; pendiente como factor topográfico, con un valor de 10/100; y los escurrimientos como factor hidrológico con un valor de 25/100.

El otro resultado se muestra para la caracterización de los escurrimientos y el cauce del río Pesquería, en el que podemos ver un resultado enfocado a la hidrología de la cuenca (Figura 31). Dicho resultado se obtuvo utilizando la herramienta de “Model Builder” de ArcMAP, diseñando así una suma ponderada personalizada para el área de estudio.

El resultado final se muestra en una escala de 10 cm, y cada uno de los pixeles representa la suma ponderada de los distintos factores considerados. Entre mayor sea la sumatoria, significa que esa área se encuentra más degradada, ambientalmente hablando (clase 5), entre menor sea la sumatoria se clasificaría como en buen estado ambiental (clase 1).

MCDM "Río Pesquería"

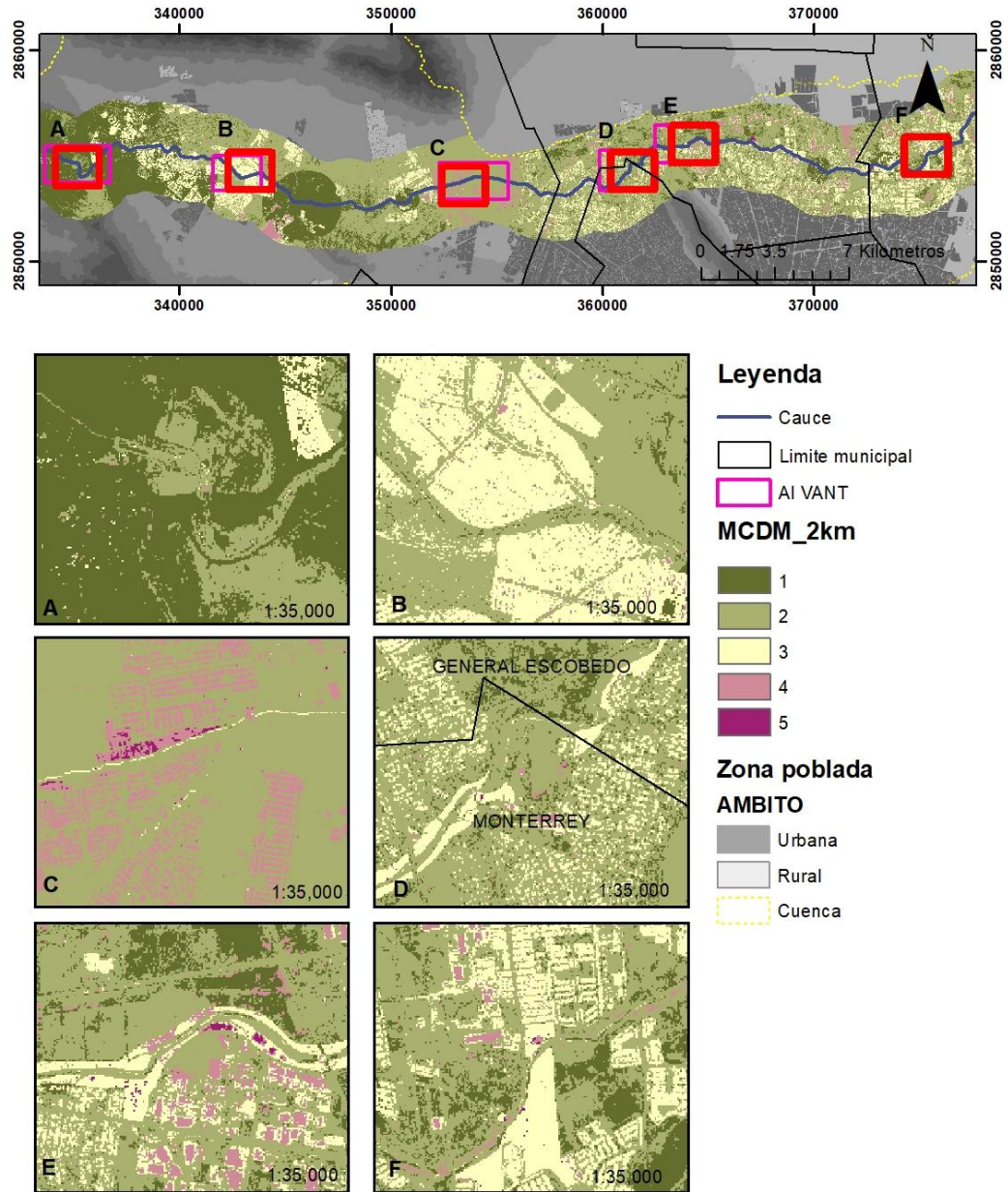


Figura 30. Resultado de análisis multicriterio (MCDM) para el río Pesquería. Nivel de análisis de 2 km de "buffer" desde el cauce.

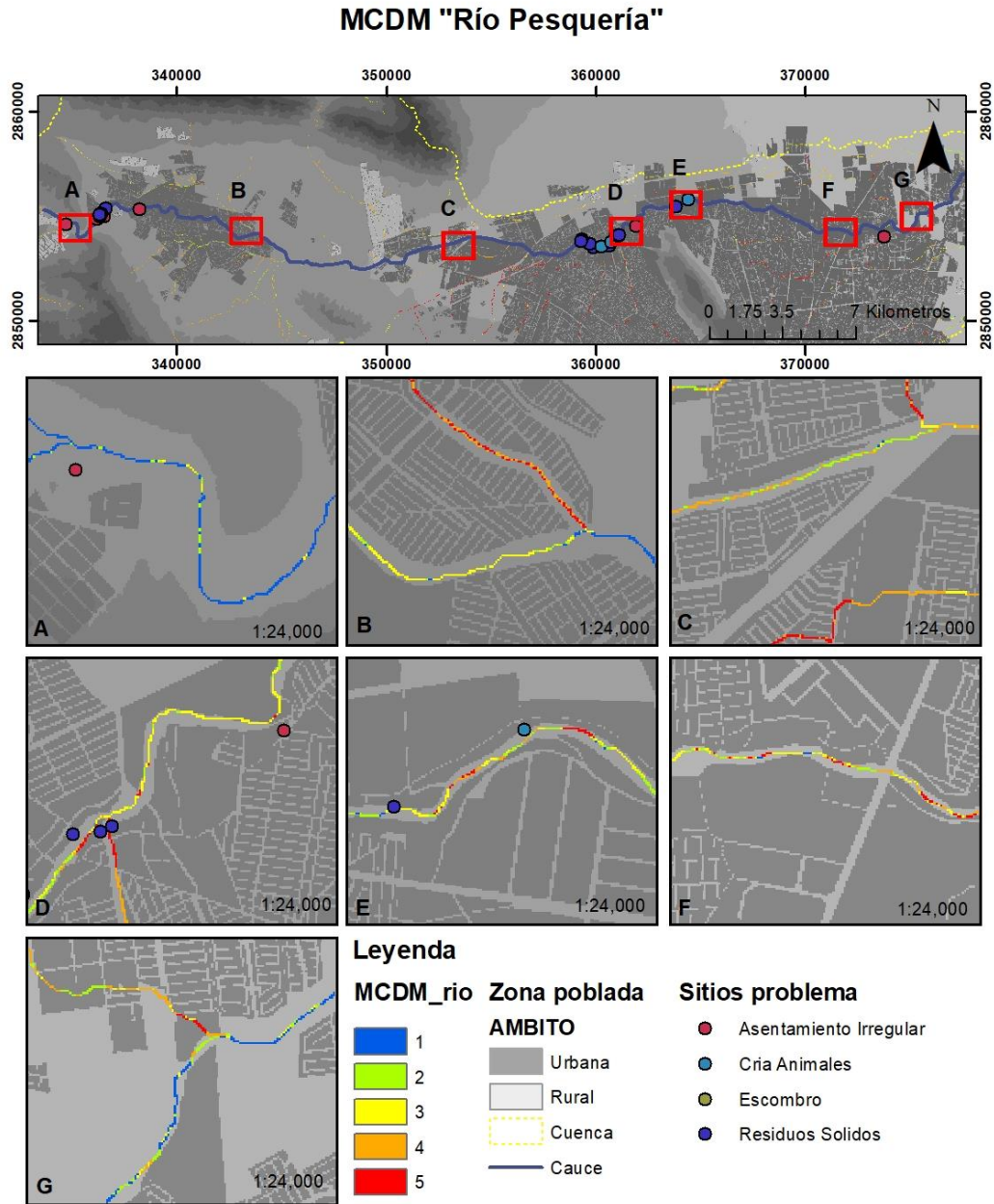


Figura 31. Modelo multicriterio de calidad ambiental para los escurrimientos de la cuenca del río Pesquería.

Mediante la comparación de los resultados obtenidos y las capas vectoriales de los datos puntuales georreferenciados como PTAR, escurrimientos y sitios problema como tiraderos de residuos sólidos, asentamientos irregulares, etc. Se pueden realizar inferencias sobre el grado de intervención que tienen en la calidad ambiental de los sitios. En la Figura 32 se puede observar cómo los escurrimientos categorizados como de mala calidad ambiental congenian con algunas de las descargas identificadas en el río. Así como

diferente a lo esperado, algunos sitios de buena calidad coinciden con la presencia de algunas de las PTAR con descarga al río.

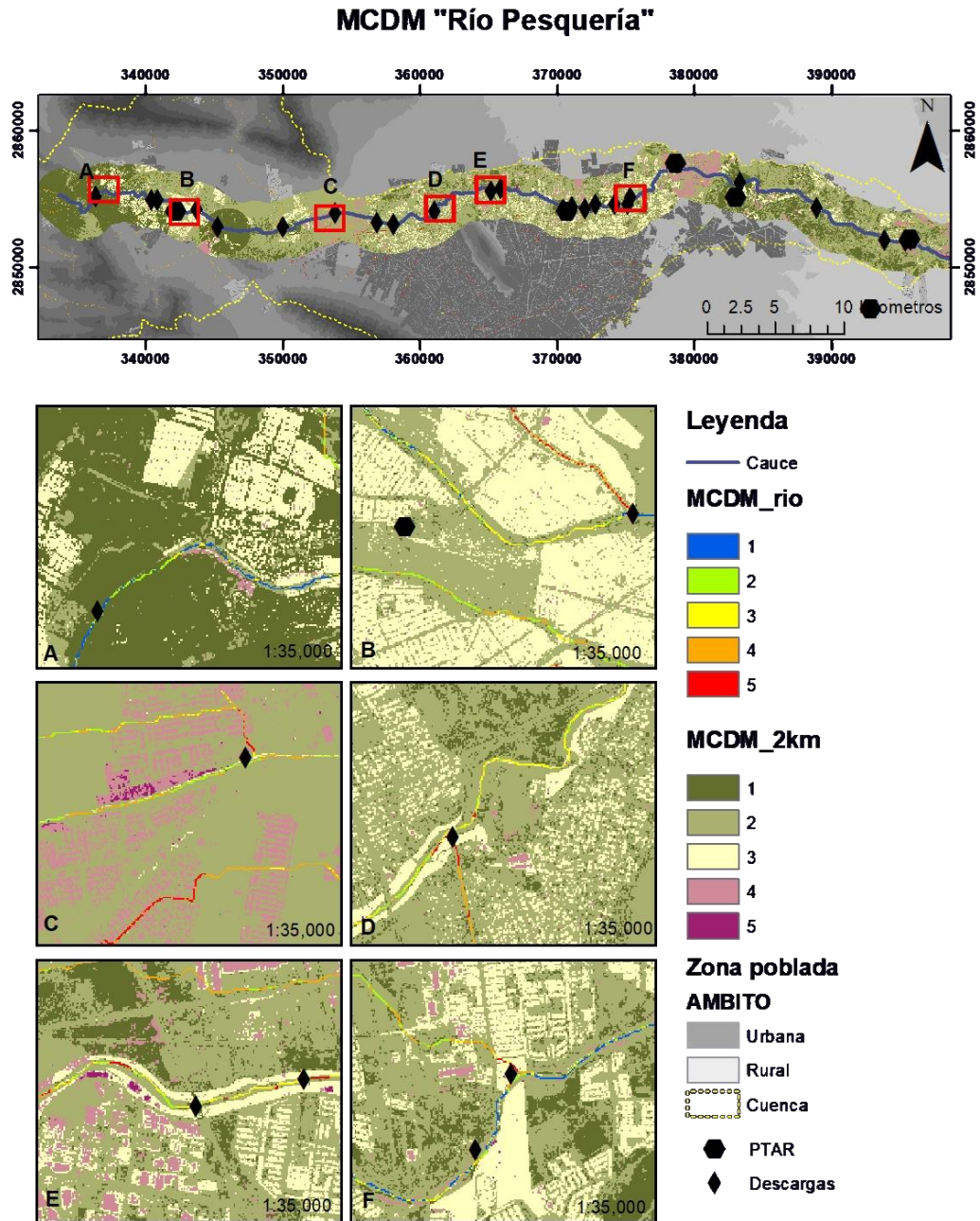


Figura 32. Mapa del MCDM hidrológico y de "buffer" de 2 km.

3.6 Discusión

El desarrollo del método de este trabajo ha logrado incrementar la información en la base de datos SIG para el río Pesquería, ya que con los vuelos fotogramétricos con VANT se generaron ortomosaicos que permiten tener una visualización con mejor resolución temporal de la situación del área de estudio.

El cuestionamiento sobre si la tecnología multispectral permite un óptimo monitoreo de las zonas riparias de una cuenca concluye de forma afirmativa. Esto debido a que, en los resultados de zonificación del área de estudio, la caracterización de la calidad de vegetación resultó un indicador clave para determinar las zonas con baja calidad ambiental.

Contar con capas de información suficiente para someter a análisis de vegetación por varios métodos proporciona mayor seguridad en los resultados. En diversos estudios se propone que un índice individual no es suficiente para conocer el estado de la vegetación (De Luca et al., 2019; Dunea et al., 2021; Malik et al., 2020). Es por ello que se decidió para este proyecto el uso de varios modelos, NDVI y GNDVI para minimizar la posibilidad de error. Los resultados muestran buena correlación entre ambos, en la mayoría de los sitios; sin embargo, se observa una diferencia entre la correlación de los índices en escala satelital y los valores obtenidos con VANT. En el análisis de regresión se obtuvo que los valores obtenidos con SENTINEL proporcionan datos más apegados a la línea de tendencia que los obtenidos por VANT.

La asociación de los índices de vegetación con los distintos indicadores seleccionados es poco comparable con lo descrito en la bibliografía ya que éstos dependerán de la zona de estudio. En comparación con el método utilizado por Yuan et al., 2019 este modelo invita al análisis visual de los resultados, en el que la recategorización de los resultados es indispensable, lo cual no dista de las necesidades de la aplicación de un método con relación no lineal con la variable y que requieren del conocimiento previo o los métodos óptimos de clasificación de las variables para obtener resultados acertados.

Algunos de los resultados en la bibliografía describen que las asociaciones entre el NDVI y la vegetación en áreas con intensa actividad humana son más complejas; sin embargo,

no se hace inferencia en la causa, además de la evidente falta de vegetación por urbanización. El MCDM desarrollado para este proyecto resalta de forma puntual que los sitios con deficiente calidad de vegetación se correlacionan con las zonas de aportes canalizados.

La mayoría de los métodos existentes se refieren a impactos ambientales específicos y ninguno se encuentra completamente desarrollado esto debido a que es imposible generalizar un método considerando que se crean dependiendo de cada proyecto y sitio de estudio. Los métodos se formulan dependiendo de un análisis ambiental. En este tipo de evaluaciones se caracterizan el tipo de impactos y la etapa en la que se producirían.

Visualmente en un resultado multicriterio se puede observar la interacción del cauce con las áreas productivas agropecuarias e industriales. La clasificación de las zonas que comúnmente se presentan aportes de desechos no tratados entra dentro de las clases de menor calidad ambiental.

Las variaciones en los niveles de DQO detectados pueden deberse al efecto de una mayor dilución y al tratamiento de las aguas residuales de los desagües. La georreferenciación de los resultados de muestreo y la identificación de las descargas no naturales permiten apreciar una correlación entre las muestras más contaminadas y dichas descargas. Una respuesta alta de DQO significa que se estaba utilizando una mayor cantidad de oxígeno del agua del río en la degeneración de desechos orgánicos. Dado que el volumen de desechos vertidos en el agua está aumentando, el DQO también aumenta.

Para la elaboración del método multicriterio fue necesario delimitar un área más específica para la suma ponderada. Se delimitó el área de estudio en el nivel de cuenca, con un “buffer” de 2 kilómetros, a lo largo de la extensión del río. Esto en conjunto con la descripción de las áreas de interés ofrece una visión de los resultados a mejor escala.

Dado el desarrollo de esta investigación, se cuestiona la importancia de la multi temporalidad para el manejo de los ríos urbanos, esto debido a que tanto en este trabajo como lo demostrado por Nilsson & Renöfält, 2008, la localización de contaminantes en el agua es altamente cambiante y la descontaminación de estos mediante procesos naturales involucra una gran cantidad de factores diferentes de las descargas de agua, entre ellos

que el aporte de contaminantes no exceda el tiempo de recuperación del río. La escorrentía, las fuentes y las vías contaminantes en diferentes tipos de áreas urbanas es fundamental para desarrollar e implementar estrategias rentables para mejorar el régimen del flujo de la corriente y la calidad del agua.

Tal como lo demuestra Monforte, las variables hidrológicas que tienen mayor impacto en la condición actual del cauce son los escurrimientos. En el análisis multicriterio a escala hidrológica se puede observar una respuesta desfavorable para los escurrimientos que se encuentran en la zona mayormente urbanizada del AMM. Se considera un grave problema la pérdida de la cubierta vegetal, observable ante los resultados de índices espectrales que delimitan áreas de vegetación muy pobre en esa zona. Se reconoce que la consecuencia ante la pérdida de vegetación es la disminución de la permeabilidad del suelo y, a su vez, zonas con mayor actividad erosiva (suelo desnudo), que además provoca un mayor arrastre de sedimentos hacía el cauce del río.

El presente estudio demostró que la degradación del medio acuático resultó en una pérdida de calidad ambiental. La suma ponderada de los factores permitió caracterizar las zonas mayormente afectadas y observar la correlación entre la deficiencia de vegetación sana y la calidad del agua deficiente. Dichos resultados se correlacionaron con la información disponible sobre las actividades antropogénicas desarrolladas en el río. La modelación de la calidad ambiental del río permite resaltar las áreas que requieren acción inmediata para la recuperación de los servicios ambientales.

El proceso de degradación afecta la construcción del ambiente y sus actividades económicas, como lo menciona Marques Machado et al. 2020. La preservación del medio ambiente es más económicamente rentable que la mitigación de efectos negativos provocados por la degradación del ambiente, como las inundaciones. Comparado a la caracterización realizada por su equipo, de acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se destaca la necesidad de ampliar la caracterización de los ríos urbanos en un enfoque socioeconómico. Aun cuando algunos de los factores investigados no se consideraron para el MCDM, éstos representan una parte importante en la interpretación de los mapas resultantes. Al tener una caracterización adecuada de los problemas

presentes en la cuenca, se pudo complementar la información y realizar una correlación entre los factores naturales y socioeconómicos.

Cabe resaltar que el MDCM pretende analizar la interacción de los ríos urbanos y de esta manera buscar la posibilidad de incrementar su calidad ambiental, considerando sus problemas y sus limitaciones. Por lo tanto, no descartamos las conectividades y las condiciones de la zona aledaña al río como elementos, con el objetivo de mantener estas importantes variables en la discusión; pero también se incorporan a la formulación del índice algunas interacciones urbanas importantes y complementarias. La modificación de la cuenca por superficies impermeables, las condiciones de saneamiento que implican son posibles.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El presente estudio aporta varios puntos de vista para disminuir las lagunas de conocimiento relacionadas con el estudio de ríos que son objeto de impacto antropogénico. Primero, se exploró la química del agua, proporcionando información necesaria para futuras campañas de seguimiento de campo detalladas, en asociación con la estructura de los ríos urbanos.
2. En segundo lugar, proporciona un enfoque metodológico para detectar la correlación entre la vegetación riparia y la calidad del agua con el entorno urbano en el que se desarrolla el estudio, como los estudios multicriterio.
3. El uso de imágenes multiespectrales de alta resolución (Sentinel II) y fotogrametría aérea multiespectral con VANT, para caracterizar la subcuenca del río Pesquería, resultó en insumos de calidad para el modelo multicriterio. La información utilizada como insumo presenta una ventaja de resolución temporal y espacial, en comparación con los resultados obtenidos por algunos métodos ya establecidos, los cuales, dentro de sus insumos, las capas de información requeridas usualmente son en una escala de 1: 250 000 a 1:10 000 y con una ventana muy grande en la temporalidad de los datos.
4. Se detectaron áreas de oportunidad en el método de campo, ya que al realizar la correlación entre los resultados de las muestras tomadas en campo y las respuestas espectrales de las imágenes producto de los levantamientos se requiere una georreferenciación más exacta. Esto también requiere que el vuelo y el muestreo se realicen de manera simultánea en zonas donde el río si presenta un flujo.
5. Los resultados del muestreo para determinar la calidad del agua por análisis de DQO muestran algunas diferencias con los resultados reportados por el SINA (CONAGUA) para el mismo año de muestreo. Sin embargo, debido a la falta de información sobre las fechas de muestreo de la institución de gobierno, los valores no pueden ser correlacionados de forma correcta y se descarta su valor respecto a la temporalidad en calidad del agua del área de estudio.
6. Se evaluó la calidad de la vegetación riparia mediante los índices espectrales NDVI y GNDVI. Los resultados fueron comparados con los resultados de calidad del agua para evaluar la correlación de éstos. Se concluye que en el caso del río Pesquería existe una correlación entre las zonas de vegetación riparia abundante y el contenido de materia orgánica del agua.
7. Se logró compilar información para alimentar una base de datos SIG de los parámetros ambientales del río en estudio. Se recolectó información antecedente y la generada por este proyecto, facilitando el reconocimiento de los problemas, a lo largo de las diferentes secciones

del río, tanto en las urbanizadas, como era esperado, pero incluyendo, además, las zonas más alejadas. Esto gracias a que se identificaron problemas sin registro previo y se determinó que tienen influencia en la calidad ambiental del río.

8. Se implementaron algunos parámetros de calidad ambiental para la valorización de los factores socioambientales del área de estudio. La estimación de parámetros ambientales utilizando satélites y sensores remotos con resoluciones más finas, como los VANT, puede ayudar en la planificación, evaluación, desarrollo y gestión de los recursos hídricos.
9. Esta investigación abordó un método para ayudar al proceso de toma de decisiones, asociado con la gestión sostenible de cuerpos de agua en áreas urbanas, mediante la selección de los mejores sitios para la intervención con procedimientos sostenibles.
10. A pesar de la disponibilidad de esquemas de clasificación preexistentes, muchas de las clasificaciones existentes no son fácilmente aplicadas por los administradores de ríos, porque han sido diseñadas para mejorar la comprensión científica, más que como una herramienta de gestión. Además de que pocos proporcionan una caracterización integrada de los diversos componentes de lo que involucra un río urbano y tienden a considerar sólo un componente del entorno del río. En este sentido, se ha reconocido que la integración de hidrología es fundamental para comprender la dinámica del hábitat en los ecosistemas fluviales urbanos.
11. La parte innovadora de esta investigación es el desarrollo de una herramienta de análisis multicriterio actualizable de alta resolución espacial, espectral y temporal. Esto es posible gracias a las diferencias de resolución en los insumos utilizados.
12. Finalmente podemos decir que la herramienta diseñada contiene lo necesario para coadyuvar en la gestión de cuencas urbanas. Especialmente en la conservación del agua y del medio ambiente, fomentando la recuperación de zonas urbanas estratégicas y el control en la contaminación de las aguas pluviales.

Recomendaciones

Se recomienda para estudios posteriores que se priorice en la uniformidad de los muestreos utilizados.

Además, se recomienda que, para la aplicación de este método en otras áreas de estudio, se debe realizar una investigación más a profundidad sobre la importancia de cada uno de los factores en la salud ambiental de los ríos urbanos, en general, para de esta manera adaptar las condiciones al río en estudio.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdollahi, A. A., Babazadeh, H., Yargholi, B., & Taghavi, L. (2020). Zoning the Rate of Pollution in Domestic River Using Spatial Multi-Criteria Evaluation Model. *Civil and Environmental Engineering*, 16(1), 49–62. <https://doi.org/10.2478/cee-2020-0006>
- Aburas, M. M., Abdullah, S. H., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2015). Measuring Land Cover Change in Seremban, Malaysia Using NDVI Index. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 238–243. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.10.043>
- Adam, E., Mutanga, O., & Rugege, D. (2010). Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: A review. *Wetlands Ecology and Management*, 18(3), 281–296. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9169-z>
- Ana Costa Marques Machado, Aline Pires Veról, Bruna Peres Battemarco, M. G. M. (2020). Proposal of a complementary tool to assess environmental river quality: The River Classification Index (RCI). In *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120000>
- Balta, M. Ö., & Yenil, H. Ü. (2019). Multi criteria decision making methods for urban greenway: The case of Aksaray, Turkey. *Land Use Policy*, 89(May), 104224. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104224>
- Beißler, M. R., & Hack, J. (2019). A combined field and remote-sensing based methodology to assess the ecosystem service potential of urban rivers in developing countries. *Remote Sensing*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/rs11141697>
- Berry, S. L., & Mackey, B. (2018). On modelling the relationship between vegetation greenness and water balance and land use change. *Scientific Reports*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27139-0>
- Burud, I., Lange, G., Lillemo, M., Bleken, E., Grimstad, L., & Johan From, P. (2017).

- Exploring Robots and UAVs as Phenotyping Tools in Plant Breeding. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 11479–11484. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1591>
- Castro-López, D., Rodríguez-Lozano, P., Arias-Real, R., Guerra-Cobián, V., & Prat, N. (2019a). The influence of riparian corridor land use on the Pesquería River's macroinvertebrate community (N.E. Mexico). *Water (Switzerland)*, 11(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w11091930>
- Castro-López, D., Rodríguez-Lozano, P., Arias-Real, R., Guerra-Cobián, V., & Prat, N. (2019b). The influence of riparian corridor land use on the Pesquería River's macroinvertebrate community (N.E. Mexico). *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091930>
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Diaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 111–124. <https://doi.org/10.16925/in.v9i17.811>
- Chen, J., Yang, S., Li, H., Zhang, B., & Lv, J. (2013). Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(4W3), 47–50. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013>
- De Luca, G., Silva, J. M. N., Cerasoli, S., Araújo, J., Campos, J., Di Fazio, S., & Modica, G. (2019). Object-based land cover classification of cork oak woodlands using UAV imagery and Orfeo Toolbox. *Remote Sensing*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/rs11101238>
- de Oliveira Campos, P. C., da Silva Rocha Paz, T., Lenz, L., Qiu, Y., Alves, C. N., Simoni, A. P. R., Amorim, J. C. C., Lima, G. B. A., Rangel, M. P., & Paz, I. (2020). Multi-criteria decision method for sustainable watercourse management in Urban Areas. *Sustainability (Switzerland)*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/su12166493>
- Dunea, D., Bretcan, P., Purcoi, L., Tanislav, D., Serban, G., Neagoe, A., Iordache, V., & Iordache, Ștefania. (2021). Effects of riparian vegetation on evapotranspiration processes and water quality of small plain streams. *Ecohydrology and Hydrobiology*,

xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.02.004>

- Esse, C., Santander-Massa, R., Encina-Montoya, F., De los Ríos, P., Fonseca, D., & Saavedra, P. (2019). Multicriteria spatial analysis applied to identifying ecosystem services in mixed-use river catchment areas in south central Chile. *Forest Ecosystems*, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0183-1>
- Estrany, J., Ruiz, M., Calsamiglia, A., Carriquí, M., García-Comendador, J., Nadal, M., Fortesa, J., López-Tarazón, J. A., Medrano, H., & Gago, J. (2019). Sediment connectivity linked to vegetation using UAVs: High-resolution imagery for ecosystem management. *Science of the Total Environment*, 671, 1192–1205. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.399>
- Everard, M., & Moggridge, H. L. (2012). Rediscovering the value of urban rivers. *Urban Ecosystems*, 15(2), 293–314. <https://doi.org/10.1007/s11252-011-0174-7>
- Ferreira, C. S. S., Walsh, R. P. D., & Ferreira, A. J. D. (2018). Degradation in urban areas. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.001>
- Gao, J., Li, S., Zhao, Z., & Cai, Y. (2012). Investigating spatial variation in the relationships between NDVI and environmental factors at multi-scales: A case study of Guizhou Karst Plateau, China. *International Journal of Remote Sensing*, 33(7), 2112–2129. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.605811>
- Gao, Y. T., & Gao, J. R. (2014). Character exploration for river ecology condition based on factor analysis. *Advanced Materials Research*, 955–959, 3461–3469. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.955-959.3461>
- Haase, D., Frantzeskaki, N., & Elmqvist, T. (2014). Ecosystem services in urban landscapes: Practical applications and governance implications. *Ambio*, 43(4), 407–412. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0503-1>
- Hernández-Tapia, G. M. (2017). *Ríos urbanos . Análisis de la relación entre el desarrollo urbano y la pérdida de los ecosistemas fluviales.*
- Hernández Guzmán, R., & Ruiz-Luna, A. (2018). Caracterización paisajística e

- hidrológica de la Sierra Madre Occidental utilizando técnicas de Percepción Remota, Modelos Digitales de Elevación y Sistemas de Información Geográfica. *La Trucha Dorada Mexicana*, January, 13–28. <https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/1364>
- Ibarrarán Viniegra, M. E., Velázquez, A. M., Pastrana López, C., & Manzanilla Interian, E. J. (2017). Determinantes socioeconómicos de la calidad del agua superficial en México. *Región Y Sociedad*, 29(69). <https://doi.org/10.22198/rys.2017.69.a325>
- Jozi, S. A., Zaredar, N., & Rezaeian, S. (2010). Evaluation of Ecological Capability using Spatial Multi Criteria Evaluation Method(SMCE) (Case study: Implementation of Indoor Recreation in Varjin Protected Area-Iran). *International Journal of Environmental Science and Development*, January, 273–277. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2010.v1.53>
- Kar, S., Rathore, V. S., Champati ray, P. K., Sharma, R., & Swain, S. K. (2016). Classification of river water pollution using Hyperion data. *Journal of Hydrology*, 537, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.03.047>
- Kinthada, N. R. (2014). Land Use/Land Cover and NDVI Analysis for Monitoring the Health of Micro-watersheds of Sarada River Basin, Visakhapatnam District, India. *Journal of Geology & Geosciences*, 03(02). <https://doi.org/10.4172/2329-6755.1000146>
- Koleff, P., Tambutti, M., March, I. J., Esquivel, R., Cantú, C., & Lira-Noriega, A. (2015). Identificación de prioridades y análisis de vacíos y omisiones en la conservación de la biodiversidad de México. *Capital Natural de México*, II(March 2017), 651–718.
- Kooistra, L., Salas, E. A. ., Clevers, J. G. P. ., Wehrens, R., Leuven, R. S. E. ., Nienhuis, P. ., & Buydens, L. M. . (2004). Exploring field vegetation reflectance as an indicator of soil contamination in river floodplains. *Environmental Pollution*, 127(2), 281–290. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00266-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00266-5)
- Li, F., Zhang, H., Meng, X., Chen, L., & Yin, D. (2012). Contamination by persistent toxic substances in surface sediment of urban rivers in Chaohu City, China. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 24(11), 1934–1941.

[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)61033-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)61033-4)

Lira-Noriega, A., Aguilar, V., Alarcón, J., Kolb, M., Urquiza-Haas, T., González-Ramírez, L., Tobón, W., & Koleff, P. (2015). Conservation planning for freshwater ecosystems in Mexico. *Biological Conservation*, 191(October 2017), 357–366. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.07.004>

Liu, C., Zhou, X., Zhou, Y., & Akbar, A. (2020). Multi-temporal monitoring of urban river water quality using uav-borne multi-spectral remote sensing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B3), 1469–1475. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1469-2020>

López-Vicente, M., & Ben-Salem, N. (2019). Computing structural and functional flow and sediment connectivity with a new aggregated index: A case study in a large Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*, 651, 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.170>

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>

Malik, S., Pal, S. C., Das, B., & Chakraborty, R. (2020). Assessment of vegetation status of Sali River basin, a tributary of Damodar River in Bankura District, West Bengal, using satellite data. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 22, Issue 6). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00444-y>

Messinger, M., & Silman, M. (2016). Unmanned aerial vehicles for the assessment and monitoring of environmental contamination: An example from coal ash spills. *Environmental Pollution*, 218, 889–894. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.019>

Michl, S., & Graizbord, C. (2002). LOS RÍOS URBANOS DE TECATE Y TIJUANA: Estrategias para ciudades sustentables. In *Institute for Regional Studies of the Californias*. http://130.191.118.251/English/Projects/Docs/Michel_Graizbord_2002_SPA.pdf

- Monforte, G. (2013). HACIA UN SISTEMA DE GESTIÓN SUSTENTABLE DEL AGUA PARA LOS USUARIOS DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY. UN ESTUDIO DE FACTORES SOCIOAMBIENTALES. *UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, TESIS DOCT.*
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (1997). Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Bulletin of the Geological Society of America*, 109(5), 596–611. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2)
- Montzka, C., Canty, M., Kreins, P., Kunkel, R., Menz, G., Vereecken, H., & Wendland, F. (2008). Multispectral remotely sensed data in modelling the annual variability of nitrate concentrations in the leachate. *Environmental Modelling and Software*, 23(8), 1070–1081. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.11.010>
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. *Centro de Información de Recursos Naturales*, 15. [http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema Índices de vegetación%2C Pedro Muñoz A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indices%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). Interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 481–486. <https://doi.org/10.1109/36.377948>
- Neachell, E. (2014). Book Review - Environmental flows: Saving rivers in the thrid millennium. *River Research and Applications*, 30(January), 132–133. <https://doi.org/10.1002/rra>
- Nilsson, C., & Renöfält, B. M. (2008). Linking flow regime and water quality in rivers: A challenge to adaptive catchment management. *Ecology and Society*, 13(2). <https://doi.org/10.5751/ES-02588-130218>
- Nong, Y., Qi, Z., & Lin, D. (2011). System identification of a small unmanned aerial vehicle based on time and frequency domain technologies. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 711–718. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2011.5970607>

- Otukei, J. R., & Blaschke, T. (2010). Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(SUPPL. 1), 27–31. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.002>
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., & Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
- Pla, M., Bota, G., Duane, A., Balagué, J., Curcó, A., Gutiérrez, R., & Brotons, L. (2019). Calibrating sentinel-2 imagery with multispectral UAV derived information to quantify damages in mediterranean rice crops caused by western swampphen (Porphyrrio porphyrio). *Drones*, 3(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/drones3020045>
- Ramírez-lópez, E. M., Thalasso, F., & Guerrero-barrera, A. L. (2011). Evaluación De Contaminantes En Agua Y Sedimentos Del Río San Pedro En El Estado De Aguascalientes. *Universidad y Ciencia*, 27(1), 17–32. <https://doi.org/10.19136/era.a27n1.137>
- Ramirez, N. L. (2019). *DISEÑO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN ESPACIAL PARA CARTOGRAFIAR SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L. MÉXICO*. UANL.
- Rinaldi, M., Gurnell, A. M., del Tánago, M. G., Bussettini, M., & Hendriks, D. (2016). Classification of river morphology and hydrology to support management and restoration. *Aquatic Sciences*, 78(1), 17–33. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0438-z>
- Ritchie, J. C., Zimba, P. V., & Everitt, J. H. (2003). Remote Sensing Techniques to Assess Water Quality / Técnicas de teledetección para evaluar la calidad del agua. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 695–704. <https://doi.org/10.14358/PERS.69.6.695>
- Rogan, J., & Chen, D. M. (2004). Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. *Progress in Planning*, 61(4), 301–325.

[https://doi.org/10.1016/S0305-9006\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0305-9006(03)00066-7)

- Saha, A., Patil, M., Goyal, V. C., & Rathore, D. S. (2018). Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Proceedings*, 7(1), 2. <https://doi.org/10.3390/ecws-3-05802>
- Schwarz, N., Moretti, M., Bugalho, M. N., Davies, Z. G., Haase, D., Hack, J., Hof, A., Melero, Y., Pett, T. J., & Knapp, S. (2017). Understanding biodiversity-ecosystem service relationships in urban areas: A comprehensive literature review. *Ecosystem Services*, 27, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.08.014>
- Solano, M. del M. (2011). “Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua de la parte media- alta de la microcuenca del río Damas y propuesta de manejo.” *UNIVERSIDAD NACIONAL ESCUELA DE CIENCIAS AMBIENTALES*, 51(3), 153. [https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Impacto ambiental por aguas residuales y residuos sólidos en la calidad del agua.pdf](https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Impacto%20ambiental%20por%20aguas%20residuales%20y%20residuos%20s%C3%B3lidos%20en%20la%20calidad%20del%20agua.pdf)
- Somvanshi.S, Kunwar.P, Singh.N.B, Shukla.S.P, & Pathak.V. (2012). Integrated remote sensing and GIS approach for water quality analysis of Gomti river , Uttar Pradesh. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(1), 62–75. <https://doi.org/10.6088/ijes.2012030131008>
- Su, T. C. (2017). A study of a matching pixel by pixel (MPP) algorithm to establish an empirical model of water quality mapping, as based on unmanned aerial vehicle (UAV) images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.011>
- Tkach, R. J., & Simonovic, S. P. (1997). A New Approach to Multi-criteria Decision Making in Water Resources. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1(1), 25–43. http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida_1/Tkach/Tkach.htm
- Torres, E. (2013). MONITOREO DE LA COMUNIDAD DE INSECTOS PARA EVALUAR LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO PESQUERÍA, DESDE EL MUNICIPIO DE GARCÍA HASTA PESQUERÍA, NUEVO LEÓN, MÉXICO. In *UANL*.

- Udias, A., Gentile, A., Burek, P., De Roo, A., Bouraoui, F., Vandecasteele, I., Lavalle, C., & Bidoglio, G. (2016). Multi-criteria framework to assess large scalewater resources policy measures. *Water (Switzerland)*, 8(9), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w8090370>
- Ustin, S. L., Roberts, D. A., Gamon, J. A., Asner, G. P., & Green, R. O. (2004). Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosystem Processes and Properties. *BioScience*, 54(6), 523. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0523:uistse\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0523:uistse]2.0.co;2)
- Vera-rozo, E. J. (2016). Medición de contaminación mediante UAV (Vehículo Aéreo no Tripulado). *Mundo Fesc*, 1(11), 16–26.
- Veról, A. P., Battemarco, B. P., Merlo, M. L., Machado, A. C. M., Haddad, A. N., & Miguez, M. G. (2019). The urban river restoration index (URRIX) - A supportive tool to assess fluvial environment improvement in urban flood control projects. *Journal of Cleaner Production*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118058>
- Vidales Rojas, M. R. (2018). PERCEPCIÓN AMBIENTAL EN POBLACIONES ALEDAÑAS AL RÍO PESQUERÍA EN LOS MUNICIPIOS DE GENERAL ESCOBEDO Y APODACA EN NUEVO LEÓN. In *El Colegio de la Frontera Norte*.
- Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Pamučar, D., Gigović, L., Drobnyak, S., Bui, D. T., & Duan, H. (2019). A hybrid GIS multi-criteria decision-making method for flood susceptibility mapping at Shangyou, China. *Remote Sensing*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/rs11010062>
- Wang, Z., Li, B., & Li, L. (2019). Research on water quality detection technology based on multispectral remote sensing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 237(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/237/3/032087>
- Wilson, C., Clarke, R., D'Arcy, B. J., Heal, K. V., & Wright, P. W. (2005). Persistent pollutants urban rivers sediment survey: Implications for pollution control. *Water Science and Technology*, 51(3–4), 217–224.
- Wohl, E., Brierley, G., Cadol, D., Coulthard, T. J., Covino, T., Fryirs, K. A., Grant, G., Hilton, R. G., Lane, S. N., Magilligan, F. J., Meitzen, K. M., Passalacqua, P., Poepl, R. E., Rathburn, S. L., & Sklar, L. S. (2019). Connectivity as an emergent property

- of geomorphic systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 4–26. <https://doi.org/10.1002/esp.4434>
- Yilmaz, B., & Harmancioglu, N. B. (2010). Multi-criteria decision making for water resource management: A case study of the Gediz River Basin, Turkey. *Water SA*, 36(5), 563–576. <https://doi.org/10.4314/wsa.v36i5.61990>
- Yuan, L., Chen, X., Wang, X., Xiong, Z., & Song, C. (2019). Spatial associations between NDVI and environmental factors in the Heihe River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 29(9), 1548–1564. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1676-0>
- Zang, W., Lin, J., Wang, Y., & Tao, H. (2012). Investigating small-scale water pollution with UAV Remote Sensing Technology. *World Automation Congress Proceedings*, June.
- Zelentsov, V., Brovkina, O., Pimanov, I., & Potryasaev, S. (2020). Automatization of forest ecosystems sustainability estimation based on complex modelling and Earth observation data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 507(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/507/1/012034>
- Zermeño-Hernández, I., Benítez-Malvido, J., Suazo-Ortuño, I., & Méndez-Toribio, M. (2020). Impact of adjacent land use on the ecological condition of riparian habitats: The relation between condition and vegetation properties. *Applied Vegetation Science*. <https://doi.org/10.1111/avsc.12508>
- Zhang, F., Liu, J., Yang, Z., & Li, Y. (2008). Ecosystem health assessment of urban rivers and lakes - Case study of “the six lakes” in Beijing, China. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*, 2(2), 209–217. <https://doi.org/10.1007/s11783-008-0007-y>
- Zingaro, M., Refice, A., Giachetta, E., D’Addabbo, A., Lovergine, F., De Pasquale, V., Pepe, G., Brandolini, P., Cevasco, A., & Capolongo, D. (2019). Sediment mobility and connectivity in a catchment: A new mapping approach. *Science of the Total Environment*, 672, 763–775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.461>

- Normas Oficiales Mexicanas

- NMX-AA-028-SCFI-2001. 2001a. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas. Diario Oficial de la Federación. México, D. F.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
 - Documentos Oficiales de la Federación.
- De la Vega, S., R. Romo y A. González, Índice de marginación por entidad federativa y municipio (2010), 1ª edición, CONAPO, México, 2011, p. 14.
- LGEEPA (2021). Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Secretaría General. Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación. URL: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_180121.pdf