



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA  
ORIENTACIÓN: MANEJO INTEGRADO DEL PAISAJE  
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

**CALIDAD DEL AGUA Y USOS DEL SUELO EN MICROCUENCAS DEL  
ORIENTE DE MICHOACÁN**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:

**ANA EDITH MERLO REYES**

DIRECTORAS DE TESIS

**DRA. MARÍA ISABEL RAMÍREZ RAMÍREZ**  
**M. en C. ROSAURA PAÉZ BISTRAN**  
Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental  
Universidad Nacional Autónoma De México



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A ti mami.*

*Gracias por enseñarme  
de mil maneras lo que es  
el amor incondicional.*

*A mis seres de luz.*

*Somos polvo cósmico.*

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante mis estudios de Maestría.

A los proyectos IAI CRN-3095 (NSF grant GEO-1128040) “Bridging Ecosystem Services and Territorial Planning” (BEST-P) y PAPIIT-UNAM IN302918 “La gobernanza forestal multinivel: evaluación participativa de acciones tempranas de REDD+ en México” por su financiamiento a lo largo del desarrollo del proyecto. Al Posgrado en Geografía por el apoyo económico para mi estancia en Francia y por el recurso PAEP para realizar mi trabajo de campo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental por ser mi segunda casa en estos últimos años. Al Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua del CIGA por brindarme los instrumentos necesarios para desarrollar toda la fase de análisis de agua.

A quienes integran las asociaciones de la Red de Monitoreo Comunitario de la Calidad del Agua – RBMM (Alternare, Bioscensis, Espacio Autónomo) y a la Dirección de la RBMM de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), por su acompañamiento en las salidas de campo y su entrega con el bienestar de la sociedad.

A mi tutora Dra. Isabel Ramírez, gracias por confiar en mí desde un inicio y por ser ese ser humano tan extraordinario que demuestra que la inteligencia, la calidez humana, la belleza y el entusiasmo pueden coexistir en una sola persona. Gracias por todo.

A mi tutora Mtra. Rosaura Páez, agradezco la confianza que puso en mí, por encomendarme este magnífico proyecto y por todo el conocimiento que ha compartido conmigo, tanto de laboratorio como de monitoreo y de vida.

Estimadas tutoras, ¡son las mejores! Gracias por siempre tener un espacio para mí por más de dos años, su entrega es digna de presumir. Dra. Adriana Flores, mi tutora “no oficial”, estas palabras también son para ti, gracias por toda tu paciencia y esfuerzo en esta tesis.

A mis sínodos, Dra. Adriana C. Flores, Mtro. Rubén Hernández y Dr. José Luis Navarrete gracias por su tiempo y acertadas observaciones para enriquecer este trabajo.

Dr. José Luis, simplemente gracias, sin usted este logro no hubiera sido posible, gracias por esa idea hace tres años.

A la Dra. Céline Duwig, ¡Merci beaucoup! Por recibirme en Institut des Géosciences de l'Environnement – UGA, y compartir conmigo tanto conocimiento durante la estancia.

Al equipo “Paisaje y Territorio en Áreas Protegidas” gracias por tan amenos seminarios que definitivamente forjaron este proyecto.

A todos mis compañeros del CIGA. Que divertidos recuerdos dejan en mi memoria. Mi querida generación (Uli, Dianiki, Gabys, Ángela, Jose, Ale), y mis amigos que siempre me motivaron y apoyaron de distintas maneras (Ake, Chayo, Lau, Pedrito, LuzOrquídea, Perla) anécdotas para toda la vida. Qué bonito ha sido coincidir.

A mi Padre, porque en unos instantes hizo que conociera mi fortaleza, a mi familia en Tepalcatepec y a mi mejor amiga Moqui-- por su apoyo.

A los mejores hermanos del mundo, Pepe y Tin, son mi ejemplo y orgullo.

A mi mami, la mejor y más paciente maestra de vida.

A mi Nemo y Dory, compañeros y calefactores de largas noches. Miau (los quiero).

## RESUMEN

La principal fuente de contaminación de la calidad del agua en microcuencas es la actividad antrópica, en particular cuando se presenta cambio de uso del suelo de forestal a agrícola. Estos impactos son especialmente graves cuando ocurren en microcuencas prioritarias para la recarga de acuíferos y conservación de la biodiversidad.

Combinando herramientas de Sistemas de Información Geográfica y estadística no paramétrica, en este estudio se analizaron las correlaciones entre la calidad del agua y los usos del suelo de siete microcuencas experimentales en el oriente de Michoacán. Además, utilizando como unidad de análisis la microcuenca y a través de la evaluación de la variabilidad espacio-temporal y un índice de Calidad del Agua, se identificó la aptitud de los sitios y parámetros actualmente monitoreados dentro de la RMCA-RBMM.

De los resultados, en general, los usos del suelo predominantes en todas las microcuencas han sido el forestal, las plantaciones arbóreas (aguacate, guayaba, durazno) y el uso agrícola, estos se han relacionado con parámetros como el oxígeno disuelto, nutrientes y coliformes, respectivamente. Los mayores impactos se han detectado en los sitios que responden a la salida de la microcuenca, que se encuentran en la parte más perturbada o con poca cubierta de bosque.

Las variaciones temporales solo han resultado para tres microcuencas, en parámetros como turbidez y sulfatos, que normalmente están relacionados con la temporada de lluvias. Mientras que las variaciones espaciales, se presentaron en al menos un par de sitios en todas las microcuencas, con excepción de parámetros como el pH, oxígeno disuelto y fosfatos, los cuales se comportan homogéneamente en todos los sitios.

La calidad general del agua, evaluada con la modificación al Índice de Calidad del Agua propuesto por Dinius, mostró distintos resultados para el uso como agua potable, para riego agrícola y vida acuática. Debido a la contaminación por coliformes fecales y totales, la mayoría de los sitios requieren purificación menor para su consumo como agua potable. En el caso del uso para riego agrícola y para vida acuática, los resultados muestran una aceptable y excelente calidad, lo cual quiere decir, utilizable para la

mayoría de los cultivos y para mantener el hábitat de los peces y crustáceos existentes. En otros casos con valores más bajos se requiere purificación menor para aquellos cultivos que requieran alta calidad del agua.

El cambio de uso del suelo de áreas forestales a uso agrícola tiene impactos negativos en microcuencas prioritarias. La planeación de uso del territorio requiere contar con información sobre estos impactos de forma constante, de modo que sea posible reducirlos y establecer nuevas formas de manejo.

## Contenido

INDICE DE TABLAS .....	7
INDICE DE FIGURAS .....	8
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	9
Objetivos .....	13
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	13
<b>MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL</b> .....	14
El enfoque de cuenca en estudios de la relación calidad del agua - usos del suelo .....	14
Usos y cubiertas del suelo .....	20
Calidad del agua .....	21
Origen y transporte de los contaminantes del agua .....	24
Monitoreo Ambiental.....	27
Monitoreo de la calidad del agua.....	27
Impactos antropogénicos en la calidad del agua .....	28
<b>UBICACIÓN GEOGRÁFICA</b> .....	33
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	35
Delimitación de microcuencas .....	35
Reclasificación de las cubiertas de suelo .....	36
Evaluación espacio - temporal de los parámetros de calidad del agua .....	38
Fuente de datos de calidad del agua y muestreo .....	38
Variaciones espaciales y temporales de los parámetros de calidad el agua .....	40
Identificación de parámetros y sitios clave para cada microcuenca.....	41
Análisis de la calidad del agua.....	41
Relación entre usos del suelo y calidad del agua .....	46
<b>RESULTADOS</b> .....	47
Análisis espacial.....	47
Delimitación de las microcuencas y distribución de los sitios de monitoreo .....	47
Categorización espacial .....	49
Distribución de los usos y cubiertas del suelo .....	49
Evaluación espacio - temporal de los parámetros de calidad del agua .....	56
Variaciones temporales.....	56
Variaciones espaciales.....	65
Calidad del agua para consumo humano, riego agrícola y vida acuática .....	70
Índice de calidad del agua .....	70
Relación entre usos del suelo y parámetros de calidad del agua .....	73

<b>DISCUSIÓN</b> .....	75
Relación entre diferentes usos del suelo y la calidad del agua.....	75
Calidad del agua .....	77
Recomendaciones para la pertinencia de los sitios de monitoreo y principales indicadores de calidad del agua.....	78
<b>CONCLUSIONES</b> .....	81
<b>BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA</b> .....	82
<b>ANEXOS</b> .....	89
Anexo I. Rangos de parámetros de calidad el agua que sobrepasan los límites máximos permisibles. ....	89
Anexo II. Fotografías comparativas entre lluvias y secas .....	93
Anexo III. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Senguio en secas .....	103
Anexo IV. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Senguio en lluvias .....	104
Anexo V. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Del Llano en secas.....	105
Anexo VI. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca La Mina en secas.....	106
Anexo VII. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca La Mina en lluvias .....	107
Anexo VIII. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Remunreje en secas ..	108
Anexo IX. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Remunreje en lluvias ...	109
Anexo X. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Zitácuaro en secas.....	110

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes antropogénicas contaminantes del ambiente acuático. ....	30
Tabla 2. Restricciones espaciales y temporales de la evolución de la calidad del agua .....	32
Tabla 3. Cubiertas del suelo de la RBMM (2015) para las microcuencas y sitios de estudio. ....	37
Tabla 4. Categorías de usos y cubiertas del suelo para microcuencas del oriente de Michoacán .....	38
Tabla 5. Parámetros de calidad del agua, unidades y métodos analíticos en laboratorio usados durante el periodo 2011-2017 para sitios de la RMCCA-RBMM. ....	39
Tabla 6. Prueba de normalidad Shapiro – Wilk ( $p < 0.05$ ) .....	40
Tabla 7. Parámetros, pesos de ponderación y fórmulas de los subíndices utilizados en el cálculo del ICA. ....	46
Tabla 8. Características de las microcuencas y los sitios de monitoreo del oriente de Michoacán. ....	47
Tabla 9. Categorías de usos y cubiertas del suelo en microcuencas y sitios de muestreo. ....	50
Tabla 10. Valores de caudal para sitios de la RMCA .....	63
Tabla 11. Promedio y desviación estándar de los parámetros de calidad del agua para diferentes microcuencas del oriente en el periodo 2011-2017 y 2015-2017* .....	64
Tabla 12. Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para analizar los parámetros que presentan variabilidad temporal en las siete microcuencas de estudio. ....	65
Tabla 13. Resultados de la prueba K-W entre sitios expresando la variabilidad espacial de cada parámetro en ambas temporadas para cada microcuenca.....	66

Tabla 14. Resultado de sitios apareados con diferencia significativa en la distribución de distintos parámetros de calidad del agua.....	67
Tabla 15. Calidad del agua en los sitios monitoreados durante el periodo 2011-2017 de la RMCCA-RBMM con base en el ICA propuesto por Dinius (1987).....	72
Tabla 16. Coeficiente de correlación Spearman entre parámetros de calidad del agua y variables de cubiertas del suelo en temporadas de lluvias y secas. ....	74

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación Cuenca-subcuenca-microcuenca (siguiendo el orden de la imagen). Fuente: Cotler y Caire (2009) .....	15
Figura 2. Representación esquemática de la relación entre procesos humanos y naturales en tres diferentes escalas. Fuente: Ives y Messerli (1990).....	16
Figura 3. Anidamiento jerárquico en las actividades de planeación-gestión a nivel de cuencas. Fuente: Modificado de Cotler y Caire (2009). ....	17
Figura 4. Ciclo hidrológico. ....	18
Figura 5. Esquematación de las zonas funcionales en función del transporte de sedimentos. Fuente: Brooks et al. (2013) .....	19
Figura 6. Vías potenciales de contaminación. Fuente: modificado de Meybeck y Helmer (1996) .....	26
Figura 7. Ejemplo de algunas alteraciones a la ruta del ciclo hidrológico causadas por actividades humanas. Fuente: Peter y Meybeck (2000) .....	29
Figura 8. Mapa de ubicación geográfica .....	34
Figura 9. Método para la delimitación de microcuencas.....	35
Figura 10. Valores de calificación y categorías generales del ICA en función del uso del agua..	44
Figura 11. Escala general de rangos para calidad de agua. Modificada de Dinius (1987). ....	45
Figura 12. Mapa de distribución de sitios de muestreo y microcuencas en el oriente de Michoacán. ....	48
Figura 13. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca Del llano .....	51
Figura 14. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca Senguio .....	51
Figura 15. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca Remunrrejé .....	52
Figura 16. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca La Mina .....	52
Figura 17. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca Remunrrejé .....	53
Figura 18. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca La Segundita.....	53
Figura 19. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca de Zitácuaro .....	54
Figura 20. Composición (%) de cubiertas y usos del suelo en siete microcuencas del oriente de Michoacán. ....	55
Figura 21. Variabilidad temporal del caudal .....	57
Figura 22. Valores (promedios $\pm$ desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos durante el periodo de lluvias y secas en los distintos sitios de monitoreo de las microcuencas evaluadas en el periodo 2011-2017.....	58

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso finito, esencial para el desarrollo de todo tipo de vida en la tierra y fundamental en las principales actividades económicas. A diferencia de otras sustancias, el agua se transforma y circula formando el ciclo hidrológico. Un ciclo cerrado donde la cantidad del agua solo se puede ver modificada a una escala mínima de tiempos geológicos (Oki y Kanae, 2006). Sin embargo, con la calidad de la misma no se puede decir lo mismo, sus características químicas, físicas y biológicas son transformadas entre las diferentes fases del ciclo hidrológico, debido a que se comporta como solvente universal y transporte natural de diversas sustancias y microorganismos. Por lo tanto, dependiendo de las características de la cuenca, incluyendo factores naturales (topografía, geología, edafología, etc.) y factores antrópicos (usos del suelo, actividades agrícolas, domésticas e industriales) la calidad del agua cambiará a lo largo de su recorrido (Kiersch, 2002).

La calidad del agua es normalmente relacionada con los usos y las cubiertas del suelo de la cuenca (Li *et al.*, 2008). Diversos estudios han encontrado que los usos del suelo inapropiados tienen impactos negativos en las características naturales del agua, la cual normalmente disminuye su calidad para consumo humano a su paso por los usos agrícolas y urbanos, relacionados con altos niveles de sulfatos, nitratos y fosfatos, así como la presencia de sedimentos y organismos patógenos (Li *et al.*, 2013; Bu *et al.*, 2014; Ding *et al.*, 2015; Flores-Díaz *et al.*, 2018).

Los nutrientes como fósforo y nitrato así como los sedimentos, comúnmente están relacionados con la agricultura (Ahearn *et al.*, 2005; Xia, Liu y Zao, 2012; Bu *et al.*, 2014; Chen y Lu, 2014). Sin embargo, en otros casos estos mismos nutrientes presentan relación con suelo desnudo o con áreas urbanas (Sliva y Williams, 2001; Ahearn *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2008; Ding *et al.*, 2015). En los estudios que analizan contaminantes microbiológicos como coliformes fecales, las correlaciones positivas han coincidido para los usos agrícola y urbano, mientras que la relación negativa se presenta con la cubierta forestal (Yong y Chen, 2002; Bu *et al.*, 2014). En cuencas con mayor cubierta forestal han demostrado que la carga de contaminantes ha sido más baja que en cuencas con

predominancia agrícola y cubierta forestal degradada (Knee y Encalada, 2014; Mello *et al.*, 2018).

Para las cuencas o cualquiera de sus divisiones (subcuenca, microcuenca, nanocuenca), uno de los principales problemas ambientales reportados en la literatura es el cambio de uso de suelo forestal a uso agrícola, así como su expansión sin medida. Tal expansión termina o deja escasa cubierta forestal, causando desequilibrio en la recarga de acuíferos y provocando erosión del suelo entre otras causas de contaminación, afectando a todo ecosistema que se abastece de ellos (Palmberg-Lerche, 1999; Ramirez, 2001; Wang, 2001; Li *et al.*, 2008; Ding *et al.*, 2015).

Respondiendo a estos cambios, a una escala más detallada se han desarrollado estudios para el estado de Michoacán, donde la pérdida neta para bosques templados en el periodo 2007-2014 rebasó las 11 mil hectáreas por año, siendo los bosques de pino y pino-encino uno de los focos principales de deforestación, los cuales han sido sustituidos principalmente por huertas de aguacate (Mas *et al.*, 2017).

En el oriente del mismo estado, a pesar de contribuir a la recarga de acuíferos para dos de las más grandes cuencas del país (Cuenca del Río Balsas y Cuenca del Río Lerma) y de ser el hábitat invernal de la especie migratoria mariposa monarca (*Danaus plexippus*), los decretos que establecieron a la zona como reserva de la biosfera y como área natural protegida no frenaron la perturbación y pérdida de los bosques después del año 2000 (Ramirez y Zubieta, 2005; Ramírez, Miranda y Zubieta, 2008). Si bien, un estudio reciente reporta para el periodo 1986-2012 regeneración natural en algunas zonas de la reserva, esta es descrita como lenta e insuficiente comparada con las crecientes pérdidas (Honey-Rosés *et al.*, 2018).

Hasta la fecha para la región del oriente de Michoacán existe una larga lista de trabajos publicados en materia de monitoreo de cambios de usos y cubiertas del suelo, debido a la continua preocupación por las consecuencias que el deterioro de la cubierta forestal ocasione (Ramírez, Azcárate y Luna, 2003; WWF, 2004, 2006, Ramírez *et al.*, 2007, 2015; Ramírez, Miranda y Zubieta, 2008; WWF-FCMM, 2009, 2010; Honey-Rosés, Baylis y Ramírez, 2011; Navarrete, Ramírez y Pérez-Salicrup, 2011; Champo-Jiménez,

Valderrama-Landeros y España-Boquera, 2012; WWF-FM, 2012; Vidal, López-García y Rendón-Salinas, 2014).

Ese tipo de trabajos en la región han dejado insumos que ayudan al desarrollo de otras investigaciones donde se involucren más variables y sirvan para los tomadores de decisiones y la difusión de información a las comunidades. Por ejemplo, la serie cartográfica generada para el proyecto de monitoreo forestal de la RBMM y su área circundante de influencia, con datos desde 1986 hasta el 2015 (Ramírez *et al.*, 2015). La cuál es actualizada cada 3 años con el método de interpretación visual interdependiente propuesto por la Organización de Agricultura y Alimentación (FAO por sus siglas en inglés, 1996, 2001) y verificación de campo. La metodología completa esta descrita en Ramírez y Zubieta (2005), Ramírez *et al.* (2007) y Navarrete *et al.* (2011).

Sin embargo, en cuanto a los trabajos que involucren la relación de calidad del agua con las cubiertas y usos del suelo, así como sus cambios, no han sido prioridad. Para el oriente de Michoacán, trabajos que respondan estrictamente a estudiar este tipo de relaciones, hasta la fecha no se encuentran publicados. Dejando así, más vulnerables a las comunidades en asentamientos rurales que se encuentran en la zona de influencia de la RBMM.

La vulnerabilidad de estas comunidades en gran medida responde a la falta de servicios básicos como es el agua entubada y el drenaje, aunado a las actividades agrícolas y ganaderas desarrolladas, las cuales representan fuentes puntuales y difusas de contaminación para los cuerpos de agua con los que se abastece la propia comunidad. Como consecuencia de la mala calidad del agua, se presentan enfermedades como el cólera, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis. En el mundo tan solo la diarrea registra unas 842,000 muertes cada año, de las cuales el 42.9% son niños menores de 5 años (OMS, 2018).

Con la salud de las comunidades y la conservación de ecosistemas como principal preocupación, en el año 2011 se creó la Red de Monitoreo Comunitario del Agua de la RBMM (RMCA-RBMM) conformada por organizaciones de la sociedad civil (OSC) (Alternare, Bioscensis, Espacio Autónomo, Fondo Mexicano para Conservación de la Naturaleza, Global Water Watch-México) y las comunidades locales con las que

trabajan, en conjunto con la Dirección de la RBMM de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México (CIGA-UNAM). La Red ha trabajado hasta la fecha en monitoreos mensuales para detectar contaminación o anomalías en cuerpos de agua dedicados al consumo humano y conservación de especies endémicas (Flores-Díaz *et al.*, 2018). Como parte de la RMCA-RBMM el Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (LASA-CIGA) cada temporada de lluvias y secas realiza análisis fisicoquímicos y bacteriológicos en equipo especializado, para verificar los resultados mensuales de los sitios de muestreo (Páez, Ramírez y Flores-Díaz, 2015).

El LASA-CIGA ha generado una base de datos de consideración y entregado reportes bianuales a todas las organizaciones participantes de la RMCA. No obstante, la presente investigación representa el primer esfuerzo de sistematización, análisis y síntesis de esos datos, desde un enfoque de cuenca.

La importancia de los estudios con un enfoque de cuenca radica en la idea opuesta de llegar a declaraciones universalmente válidas sobre los impactos de alguna variable en el recurso hídrico, pues las relaciones de las variables a analizar dependen de características distintivas de cada cuenca o microcuenca (Sliva y Williams, 2001; Ding *et al.*, 2015). En este caso, los usos del suelo responderán a una escala espacial adecuada de acuerdo con la información disponible de datos de calidad del agua, para de esta manera relacionar estadísticamente ambas variables y discutir sobre su posible relación en términos reales.

Para conocer la situación del oriente de Michoacán en este tipo de estudios, nos planteamos las siguientes preguntas:

A escala de microcuenca, ¿Cuáles son los usos del suelo predominantes en la zona de estudio?

¿Cuáles parámetros de calidad del agua presentan diferencias espaciotemporales estadísticamente significativas?

¿Cómo es la calidad de agua de los sitios de monitoreo de acuerdo con su uso (uso y consumo humano, agrícola, conservación de vida acuática)?

¿Cómo están relacionadas las diferencias espaciotemporales de la calidad del agua con el uso del suelo en los sitios de monitoreo de la RMCA?

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la relación entre la calidad del agua y los usos del suelo a nivel microcuenca en el oriente de Michoacán.

Objetivos específicos

- Identificar cubiertas y usos del suelo (CUS) predominantes en las microcuencas con sitios de monitoreo de la calidad del agua.
- Analizar las variaciones espaciales y temporales de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos del agua.
- Evaluar la calidad del agua para consumo humano, riego agrícola y vida acuática.
- Analizar la correlación entre parámetros de calidad de agua y los usos del suelo en las microcuencas seleccionadas.

## MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

El enfoque de cuenca en estudios de la relación calidad del agua - usos del suelo

La cuenca hidrográfica se puede definir a grandes rasgos como: "...zona geográfica drenada por una corriente de agua" (FAO, 2009a) o el "área de terreno cuya topografía hace que el agua drene en un punto común" (Maass, 2003).

De otra forma más completa se conceptualizan como: "El espacio geográfico en el cual transcurre el movimiento superficial del agua; una unidad espacial en la que se conjuntan condiciones particulares de clima, relieve, suelo y vegetación que controlan los procesos hidrológicos que a su vez determinan la cantidad y calidad del agua así como su distribución espacial y temporal" (Burgos y Bocco, 2015).

En una cuenca, todas las actividades relacionadas con atributos espaciales se reflejan en la cantidad y calidad de agua. El agua transporta o deja de transportar los elementos que se generan por las actividades productivas, por la forma de apropiación del territorio o por acciones explícitas de conservación (Bunge *et al.*, 2015).

La red hidrográfica que atraviesa el territorio va esculpiendo el relieve que conforma las cuencas y en función de la escala geográfica de estudio estas se dividen por órdenes de corriente en subcuencas y microcuencas; las primeras son parte del territorio de la cuenca donde todos los escurrimientos confluyen y convergen en el río principal. La microcuenca es parte de la subcuenca, puede corresponder a ríos de primer o segundo orden y pueden estar organizadas en comunidades o ejidos y propiedad privada, que manejan los recursos naturales, y donde se realizan actividades productivas

esencialmente primarias (Cotler y Caire, 2009) o asentamientos y usos del suelo urbanos (Fig.1).

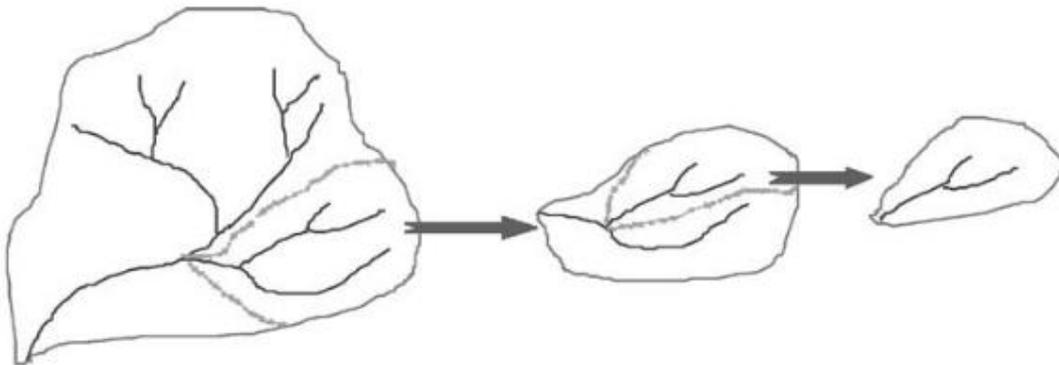


Figura 1. Relación Cuenca-subcuenca-microcuenca (siguiendo el orden de la imagen). Fuente: Cotler y Caire (2009)

Esta jerarquía comúnmente se maneja sin considerar un área o un rango delimitado que diferencie una de la otra. No obstante Ives y Messerli (1990) las clasifican por su magnitud en: “micro” (menos de 50 km<sup>2</sup>), “meso” (de 50 a 20 000 km<sup>2</sup>) y “macro” (más de 20 000 km<sup>2</sup>). Si bien son arbitrarios los límites superior e inferior de estas tres categorías, la clasificación sirve para evaluar en el ámbito de una cuenca las repercusiones potenciales de las actividades humanas (como la agricultura, la explotación forestal, el pastoreo, etc.) en comparación con los efectos de los fenómenos naturales (como los movimientos geológicos o fenómenos meteorológicos extremos) (Fig. 2) (FAO, 2009b).

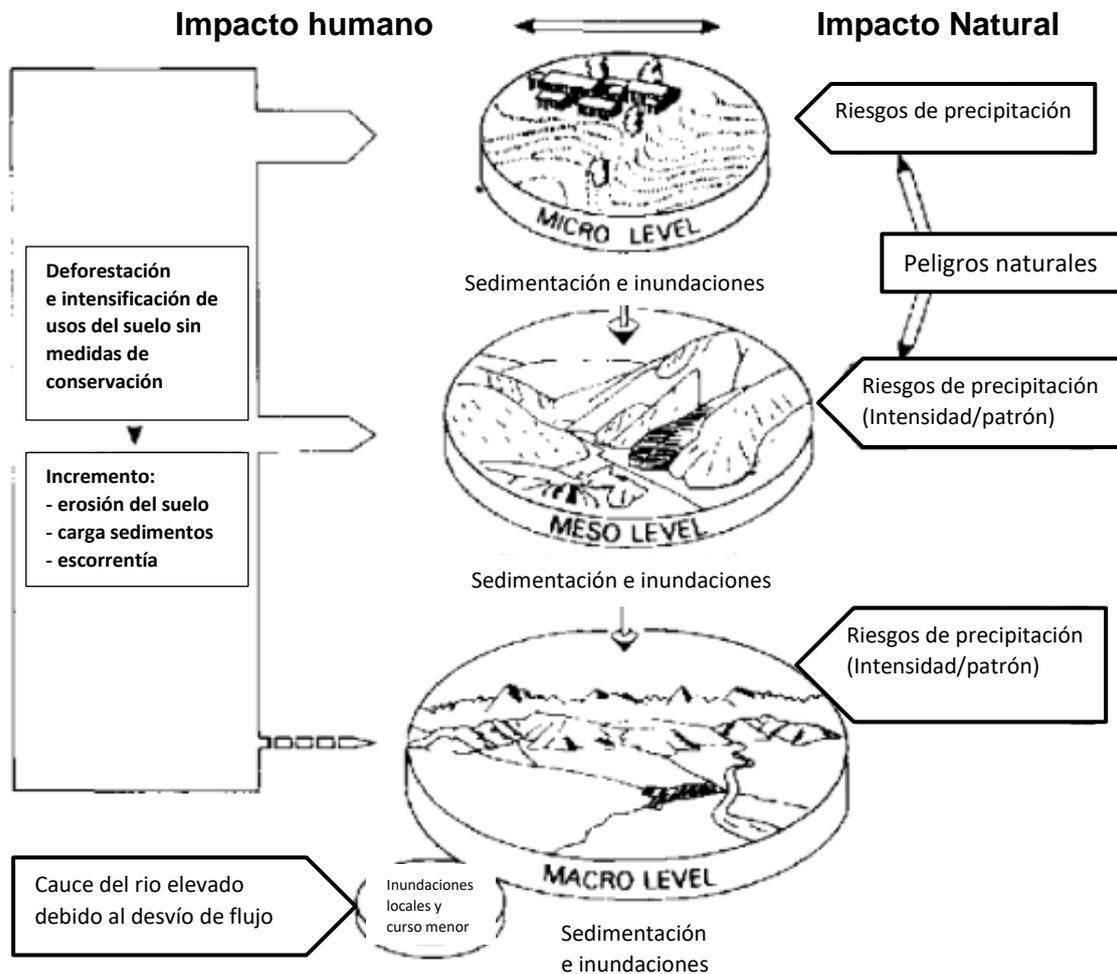


Figura 2. Representación esquemática de la relación entre procesos humanos y naturales en tres diferentes escalas. Fuente: Ives y Messerli (1990)

De acuerdo con Ives y Messerli (1990) y explicando su representación esquemática, en las unidades de escala micro los efectos de las actividades humanas en los procesos de las cuencas tienden a ser mayores que los de los fenómenos naturales. En las unidades de escala media los procesos naturales son tan decisivos como los factores humanos, lo que hace a las “mesocuenas” particularmente vulnerables a la degradación de los recursos naturales. Por último, en las “macrocuencas”, la magnitud de los procesos naturales supera los efectos de las intervenciones humanas percibidos específicamente en el sitio (Ives y Messerli, 1990; FAO, 2009b).

El tamaño y la jerarquía de las unidades hidrográficas (cuenca, subcuenca y microcuenca) son determinantes en la gestión y deben considerarse desde la planeación hasta la implementación de las acciones. La jerarquización de las unidades hidrográficas (cuenca-subcuenca-microcuenca) y su anidamiento conducen a que en cada una de ellas se consideren temas diferentes, como se plantea en la Figura 3 (Cotler y Caire, 2009).

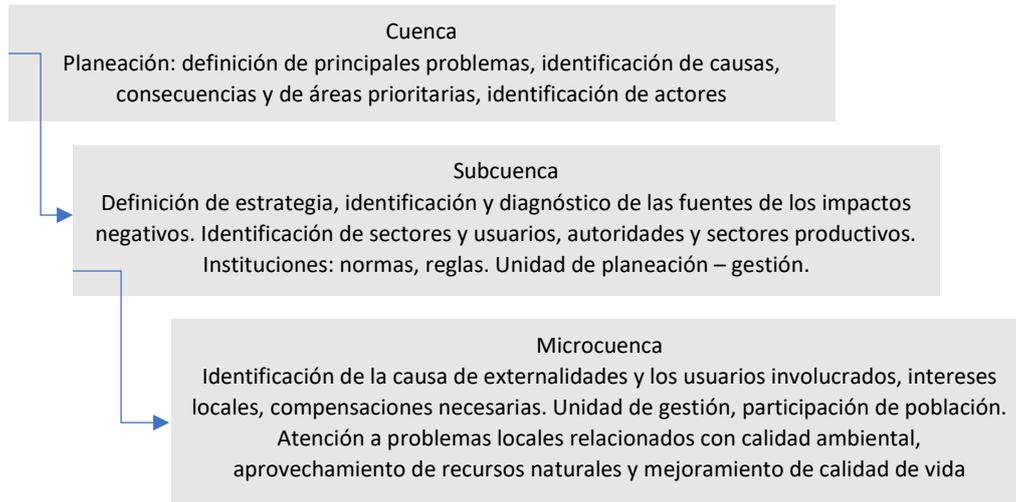


Figura 3. Anidamiento jerárquico en las actividades de planeación-gestión a nivel de cuencas. Fuente: Modificado de Cotler y Caire (2009).

Las cuencas (y sus subdivisiones) son los sistemas utilizados para estudiar el ciclo hidrológico (Fig. 4), y nos ayudan a comprender cómo las actividades humanas influyen en los componentes del ciclo hidrológico (Brooks, Ffolliott y Magner, 2013). Constituyen un sistema complejo, dinámico y abierto, que no encierra la idea de homogeneidad. Al contrario, al interior de este territorio los gradientes modelados en el relieve regulan la dinámica del agua (Cotler y Caire, 2009).

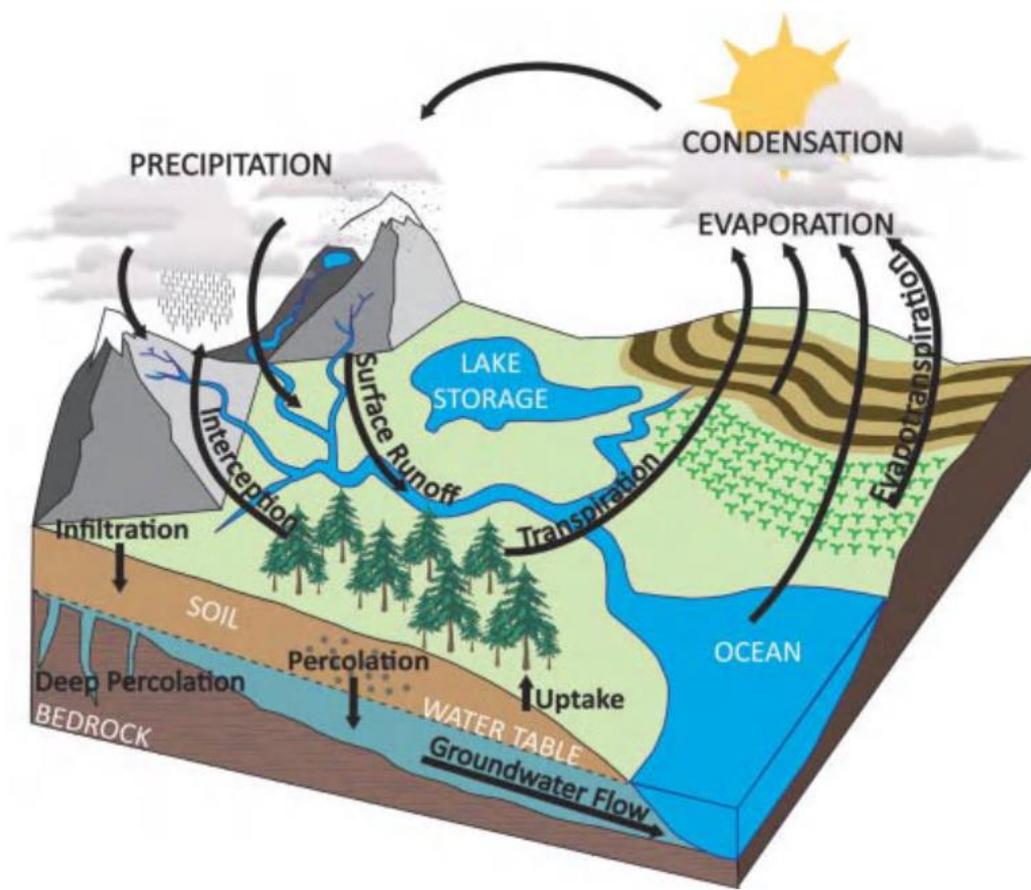


Figura 4. Ciclo hidrológico. Fuente: Brooks, Ffolliott y Magner (2013).

No sólo la discretización espacial anidada en subcuencas y microcuencas es la única ni la más completa vía de fragmentación geográfica de una cuenca hídrica. Existe la posibilidad de subdividir una cuenca en diferentes unidades espaciales a partir de la función hidrológica específica que desempeñan (Garrido, Pérez y Enríquez, 2010).

Hidrológicamente, hay tres funciones fundamentales de cuencas hidrográficas: (1) recolección del agua de lluvia (zona de recarga), deshielo y almacenamiento que se convierte en escorrentía, (2) almacenamiento de varias cantidades de agua y duraciones y (3) descarga de agua como escorrentía. Ecológicamente, la cuenca funciona de dos maneras adicionales: (4) proporciona diversos sitios y vías a lo largo de las cuales se producen reacciones químicas vitales, y (5) proporciona un hábitat para la flora y la fauna que constituyen los elementos biológicos de los ecosistemas (Black, 1997).

Desde una perspectiva geomorfológica y enfatizando en el transporte de sedimentos la división de la cuenca, subcuenca o microcuenca se zonifica en: 1) zona de erosión

(cabecera de la cuenca, mayores elevaciones), 2) zona de transición (entre las cabeceras y la zona inferior a la desembocadura de los principales ríos, desde pendientes suaves hasta amplios valles) y 3) zona de depósito (emisión y deposición de los principales ríos) (Fig.5). Los ríos generalmente fluyen desde una zona de erosión alta y alta gradiente a través de una zona de transición a una zona de deposición de gradiente bajo (Brooks *et al.*, 2013; Shumm, 1977).

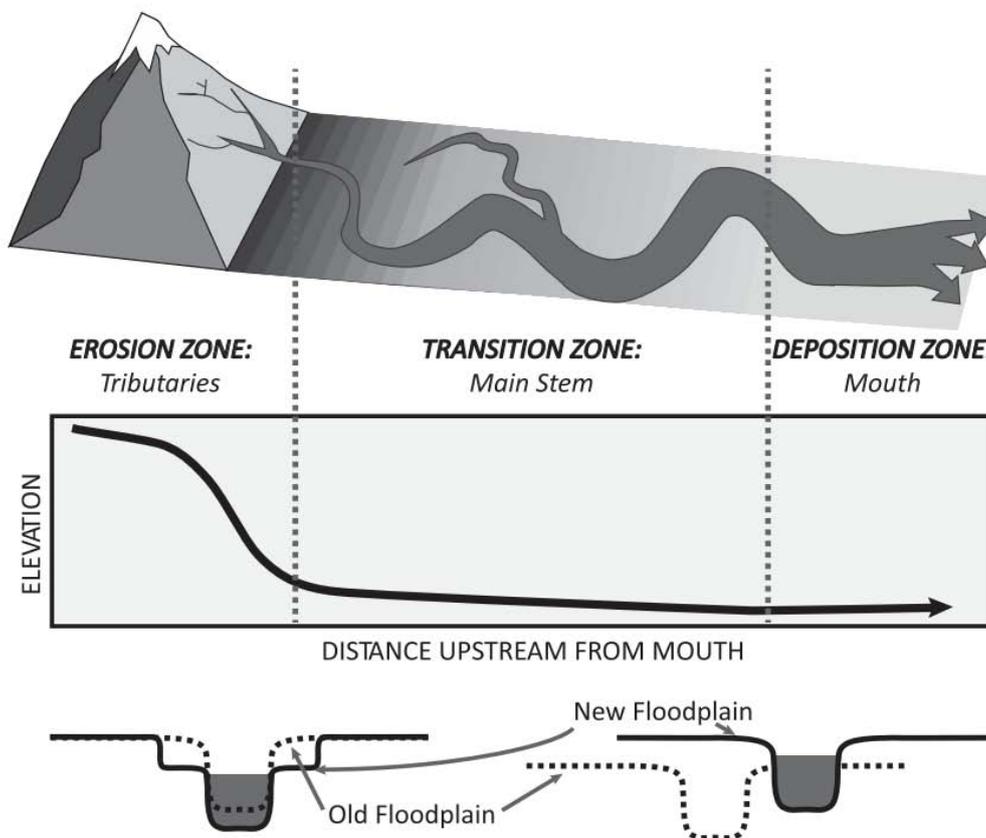


Figura 5. Esquematización de las zonas funcionales en función del transporte de sedimentos. Fuente: Brooks *et al.* (2013)

Con base en la altimetría y morfografía las zonas funcionales se puede dividir en cuenca alta, cuenca media y cuenca baja y los criterios para su delimitación se sintetizan a continuación (Garrido, Pérez y Enríquez, 2010):

- o Cuenca Alta: se identifica en las áreas más elevadas, normalmente compuesta por conjunto de montañas y lomeríos. Son identificados nacimientos de ríos y corrientes de ordenes menores a tres.

- Cuenca Media: zona intermedia bajo la cuenca alta y de transición hacia la cuenca baja. Su composición geomorfológica tendrá muchas variaciones, pero principalmente se encuentra formada por un sistema de lomeríos, llanos, planicies intermontanas, etc. Los tipos de ordenes son más integrados y corresponden a corrientes de segundo, tercero y cuarto orden.
- Cuenca Baja: zona de emisión de toda la red hidrográfica, con las menores altitudes, que incluyen salida al mar o algún cuerpo de agua interno, cuando la cuenca es endorreica. Se compone de planicies de inundación y comprende terrazas fluviales.

“La cuenca hidrográfica entrelaza la relación sociedad-naturaleza en el espacio geográfico, pero también incorpora componentes institucionales y de control político” (Burgos y Bocco, 2015).

El enfoque de cuenca hidrográfica es un marco de coordinación para la gestión ambiental, que se centra en los esfuerzos del sector público y privado para abordar los problemas de mayor prioridad dentro de las áreas geográficas definidas hidrológicamente, teniendo en cuenta tanto las aguas subterráneas como superficiales (DeBarry, 2004)

Desde una perspectiva ambiental, el enfoque de cuenca hace explícita la relación entre los territorios y las poblaciones a lo largo de la cuenca, considerando todos los impactos (positivos y negativos) que se generan por las actividades productivas y domésticas, los cuales se irán acumulando a lo largo del recorrido de los ríos y que se reflejan en la calidad, cantidad y variabilidad de los afluentes (Cotler, 2015).

“Gracias a sus zonas funcionales, el enfoque de cuencas nos da la posibilidad de evaluar y de explicar las externalidades resultantes de los diferentes usos del suelo” (Cotler y Priego, 2004).

Usos y cubiertas del suelo

Usos del suelo y cubiertas del suelo comúnmente se presentan abreviadas como CUS (cubiertas y usos del suelo) y con las siglas en inglés de LULC (Land-use and Land-cover). La investigación científica de las causas y consecuencias de los cambios en CUS requiere

un enfoque interdisciplinario que integre tanto los métodos científicos naturales como los sociales, esto ha emergido en una nueva disciplina conocida como *Land-change science* (Ellis y Pontius, 2007; Turner, Lambin y Reenberg, 2007), la cual busca comprender las dinámicas humanas y ambientales que dan lugar a los cambios en los usos y las cubiertas del suelo, no solo en términos de su tipo y magnitud sino también su ubicación (Rindfuss *et al.*, 2004).

A pesar de su común agrupación en la literatura científica, en este trabajo es importante diferenciar entre los conceptos de cubierta del suelo y uso del suelo; "Cubierta del suelo" se refiere a la naturaleza o relieve del terreno, que puede ser identificada visualmente en campo o a través de medios de percepción remota; mientras que, "uso del suelo" generalmente requieren la integración de métodos en campo (conocimiento de expertos, entrevistas a usuarios) para determinar qué actividades humanas están ocurriendo en diferentes partes del paisaje, incluso cuando la cubierta del suelo parece ser la misma. En síntesis, expresa el aprovechamiento o los fines económicos de esas cubiertas (Ramírez, 2001; Ellis y Pontius, 2007).

Los usos humanos más espacialmente y/o económicamente importantes de la tierra a nivel mundial incluyen el cultivo en diversas formas, el pastoreo de ganado, asentamiento y construcción, reservas y áreas protegidas, y extracción de madera. Estos y otros usos del suelo han transformado acumulativamente las cubiertas naturales de la tierra a escala mundial (Turner, Meyer y Skole, 1994).

#### Calidad del agua

Mientras que la cantidad de agua está determinada por un único parámetro – el volumen de agua – la calidad del agua no se puede expresar de una forma tan simple como esa. No existe el agua pura natural, su composición se altera en función de cualquier cosa que el agua haya recogido durante su viaje desde las nubes a la tierra y al cuerpo de agua: a través del viento, contacto con el suelo y formaciones geológicas, y en diversas formas, ya sea disuelta, coloidal o suspendida (Mostertman, 1977; Abbasi y Abbasi, 2012).

De esta manera se entiende la complejidad del concepto de calidad del agua, debido a que muchos factores influyen en ella, su determinación es en función de su uso (uso

para consumo humano, para riego agrícola, para vida acuática, pesca, recreación, etc.) y cada uno de ellos mantendrán diferentes criterios (Beamonte, Casino y Veres, 2010). Estos criterios son muy variables; la calidad puede ser lo suficientemente buena para usar como refrigerante en una industria, pero no adecuada para beber, puede ser buena para irrigar algunos cultivos, pero no suficiente para irrigar otros, así como puede ser adecuado para el ganado, pero no para el cultivo de peces o recreación (Abbasi y Abbasi, 2012).

Los criterios dependerán de los estándares propuestos en cada país para componentes fisicoquímicos o bacteriológicos asociados a cada uso del agua, comúnmente dirigidos al uso para consumo humano. Dejando claro que un estándar es una regla o medida específica establecida por una autoridad, por ejemplo por las comisiones de cuenca o por el gobierno federal o estatal (DeBarry, 2004). No obstante, en algunos casos no existe regulación en el país, por lo que se utilizan los estándares técnicos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011).

Los cuerpos de agua se pueden caracterizar completamente por tres tipos de parámetros: físicos, químicos y biológicos. Una evaluación completa de la calidad del agua se basa en la medición apropiada de estas características (Meybeck y Helmer, 1996). Las concentraciones de cada parámetro son resultado de diversas interacciones, las más importantes son:

- 1) aportes de actividades antropogénicas como: descarga de aguas residuales, arrastre de residuos de áreas pobladas, lavado de tierras intensamente cultivadas, contaminantes gaseosos en la atmósfera, etc.

- 2) características geoquímicas del área de drenaje (expresadas en concentraciones de aniones y cationes), y

- 3) procesos propios de los ríos como sedimentación, reacciones biológicas, etc. (Davis y Zobrist, 1978).

La composición “natural” del agua se puede ver alterada por cada uno de sus diversos usos. Cualquier proceso que contribuya a la restricción de la idoneidad del agua para cumplir uno o más de sus propósitos se denomina contaminación del agua (Mostertman,

1977). Y es “contaminante” el exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a los humanos, animales, plantas y bienes, o bien, que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua (Jiménez Cisneros, 2001).

La contaminación por lo tanto se puede clasificar en los mismos tres tipos de componentes; físicos, químicos y biológicos con causas y consecuencias diferentes:

- a) *Contaminación biológica: microorganismos – comúnmente bacterias- que no pertenecen o se encuentran en concentraciones elevadas en los cuerpos de agua. Se derivan de la falta de drenajes y sistema de tratamiento de aguas o hábitos de higiene incorrectos. Causan enfermedades gastrointestinales en muchos casos mortales para niños y adultos mayores (Albert, 1997).*
- b) *Contaminación física: alteraciones en los parámetros físicos del cuerpo de agua (temperatura, turbidez, sólidos, conductividad eléctrica). Los orígenes y causas son diversos, desde descargas industriales y domésticas hasta erosión atípica por actividades antrópicas (Jiménez Cisneros, 2001).*
- c) *Contaminación química: alteraciones en los niveles naturales de los componentes químicos del agua (pH, alcalinidad, oxígeno disuelto, dureza, iones) e introducción de nutrientes (fósforo y nitrógeno) y metales en cantidades que rebasan la capacidad de los mecanismos naturales de degradación. Son derivados de drenado de minas, desechos solubilizados de la agricultura, ganadería, aguas residuales municipales, desechos líquidos industriales y compuestos radioactivos. Tanto pueden ser desechados directamente como pueden formarse durante el procesamiento del agua -por ejemplo, el tetracloruro de carbono y cloroformo- al momento de la desinfección con cloro. También influirán los parámetros físicos del medio. Las consecuencias de la contaminación química se ven reflejadas en la salud de la vida acuática, y en la de todo ser vivo que consuma o se exponga a la misma (Mostertman, 1977; Albert, 1997; Jiménez Cisneros, 2001).*

A pesar de que la contaminación esté relacionada con la calidad del agua, expresada como “mala o baja calidad del agua”, es importante dejar claro las diferencias de ambos términos como lo expresan Meybeck y Helmer (1996):

❖ Calidad del ambiente acuático:

- Conjunto de concentraciones, especiaciones y particiones físicas de sustancias inorgánicas u orgánicas.
- Composición y estado de la biota acuática en el cuerpo de agua.
- Descripción de variaciones temporales y espaciales debidas a factores internos y externos al cuerpo de agua.

❖ Contaminación del ambiente acuático:

Introducción antrópica (directa o indirecta) de sustancias o energía que producen efectos nocivos tales como:

- daño a los recursos vivos,
- riesgos para la salud humana,
- impedimentos para las actividades acuáticas, incluida la pesca,
- deterioro de la calidad del agua con respecto a uso agrícola, industrial y económico, y
- reducción de la calidad de vida

Origen y transporte de los contaminantes del agua

Los contaminantes pueden ser clasificados por el proceso en el cual han sido generados, si la contaminación es resultado de un proceso en el cual los humanos no participan, se considera de origen natural (p. ej. Metales pesados derivados de una erupción volcánica). En cambio, si independientemente de la naturaleza del contaminante, como resultado de las actividades humanas, dicho contaminante se encuentra en un medio al que no corresponde, o en concentraciones por arriba de las naturales – por ejemplo las concentraciones actuales del bióxido de carbono en la atmósfera – entonces, la contaminación es de origen antropogénico (Albert, 1997).

La contaminación puede resultar de fuentes puntuales y fuentes difusas; la diferencia entre ambas es que las fuentes puntuales pueden ser colectadas, tratadas o controladas

y las difusas no. Aunque, estas últimas con mucho esfuerzo puede llegar a ser controladas, ya que resultan de un gran número de fuentes puntuales (Meybeck y Helmer, 1996).

Las fuentes puntuales principalmente se presentan como descargas residuales al final de una tubería que va directa a cuerpos de agua. Las fuentes difusas son resultado directo de los usos del suelo y la escorrentía de agua de lluvia que arrastra fertilizantes aplicados, así como emisiones de gases y aerosoles de la industria (Norman Peters y Meybeck, 2000).

Además del agua, los contaminantes se pueden transportar por diversas vías, las cuales incluyen la atmósfera y el suelo (Fig.6), por lo tanto terminan incorporados al ciclo hidrológico y a través de la atmósfera son ampliamente dispersados por los sistemas meteorológicos y depositados a escala regional y global (Meybeck y Helmer, 1996). En consecuencia, la alteración de las vías hidrológicas o los cambios en la calidad del agua a lo largo de una vía pueden afectar la composición del agua con la que se mezcla (Norman Peters y Meybeck, 2000).

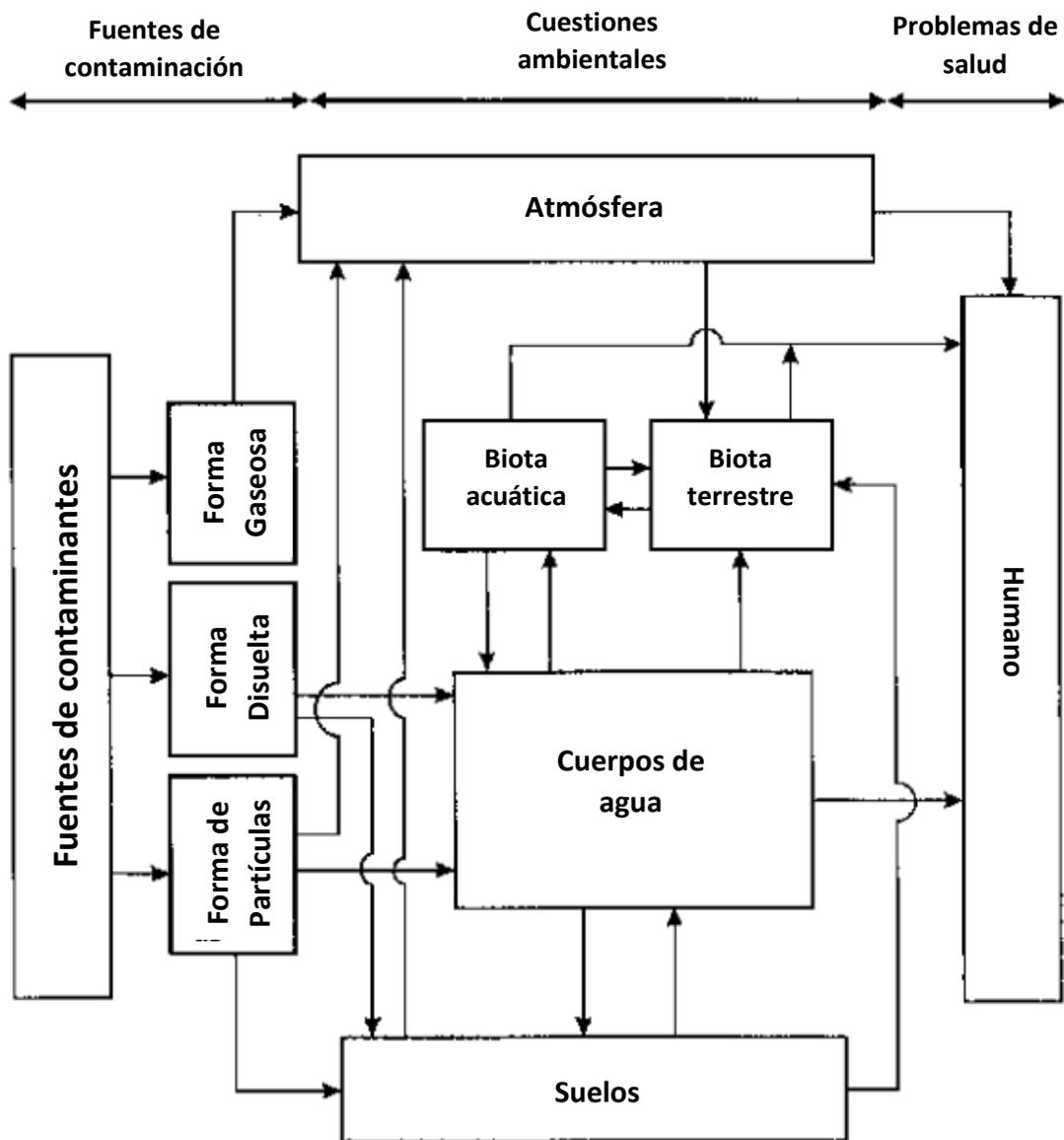


Figura 6. Vías potenciales de contaminación. Fuente: modificado de Meybeck y Helmer (1996)

## Monitoreo Ambiental

El monitoreo es la evaluación de algo que se quiere estudiar para conocer cómo cambia a lo largo del tiempo o del espacio como consecuencia de factores conocidos (Chediack, 2009). De acuerdo con Perevochtchikova (2009) el concepto de monitoreo se debe de considerar más allá que un aspecto técnico de la observación geográfica pues abarca lo siguiente:

- *un sistema sociotecnológico en el que participan científicos, ingenieros, políticos, administradores, etc.;*
- *un sistema de interés interinstitucional, porque abarca intereses de las instituciones sociales, políticas, económicas, de regularización ambiental, ordenamiento territorial, política energética, e incluso de seguridad nacional;*
- *un concepto que evoluciona continuamente para incluir nuevos aspectos; conforme se amplía el conocimiento científico surgen modernizaciones en la tecnología y modificaciones en las leyes y normas;*
- *en los planos global, regional y local el monitoreo puede ser visto a escalas espacial y temporal (perspectiva histórica de cambios). Además, en la escala espacial intervienen dos subdivisiones territoriales: la limitación administrativa y la natural (como los límites municipales y las cuencas hidrográficas).*

“El sistema de monitoreo ambiental suele incluir varias categorías de medición de diferentes componentes de la naturaleza como la atmósfera, la biosfera, la hidrosfera y la litosfera” (Perevochtchikova, 2009).

## Monitoreo de la calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua se define como la medición y observación estandarizada a largo plazo del entorno acuático para definir el estado y las tendencias de sus características naturales (Meybeck, Kimstach y Helmer, 1996).

El monitoreo y la evaluación de la calidad del agua se basan, en las propiedades físicas, químicas y biológicas fundamentales del agua. Sin embargo, el monitoreo y la evaluación de la calidad del agua es un proceso de análisis, interpretación y comunicación de esas propiedades dentro del contexto más amplio de la actividad y el uso humanos, y la conservación del medio ambiente natural. Por lo tanto, no es un proceso fijo, sino que se adapta a la luz de las necesidades locales, nacionales o internacionales. Los estilos y

las estrategias de gestión varían mucho, según las instituciones, los recursos y las prioridades (OMS, 1996).

#### *Monitoreo comunitario participativo*

El Monitoreo comunitario participativo (MCP) conocido en inglés como *community-based monitoring* es una práctica social que contribuye de forma valiosa a la gestión ambiental y la construcción de sociedades activas para el futuro sostenible (Burgos *et al.*, 2013).

Específicamente, la definición de MCP se refiere al “proceso en el que colaboran diferentes sectores de una comunidad (ciudadanos interesados; grupos comunitarios; instituciones de gobierno, industria y academia) para monitorear, dar seguimiento y responder a asuntos de interés público” en materia ambiental (Deutsch, Ruiz-Córdova y Duncan, 2010; Perevochtchikova *et al.*, 2016).

En particular para el agua, el monitoreo comunitario es un proceso participativo que busca vincular a un grupo comunitario con las técnicas apropiadas para entender y proteger su cuenca, trabajando a favor de un modo de vida saludable y sustentable (Flores-Díaz *et al.*, 2013).

Los beneficios son vastos para todas las partes que conformen el monitoreo, para las agencias estatales se les facilita extender sus redes de monitoreo y tener ahorros presupuestarios, además de la contribución a la planeación gubernamental gracias a la participación pública (Cuthill, 2000; Páez *et al.*, 2011). Mientras que para las comunidades y organizaciones no gubernamentales el beneficio se obtiene a través del desarrollo del recurso humano, en la medida que comprometen a voluntarios, crean y consolida conexiones con instituciones; dando como resultado la construcción de redes sociales y de relaciones que contribuyen al desarrollo de comunidades sanas (Páez *et al.*, 2011).

#### Impactos antropogénicos en la calidad del agua

Las alteraciones físicas como urbanización, transporte, agricultura (irrigación), deforestación y reforestación, drenaje de tierras, canalización y represas y minería alteran las vías hidrológicas y pueden cambiar las características de calidad del agua al

modificar los materiales con los que interactúa la misma (Fig.7) (Norman Peters y Meybeck, 2000).

Principalmente las prácticas de uso del suelo pueden tener impactos importantes en la calidad del agua, lo que a su vez puede tener efectos negativos aguas abajo. Los impactos incluyen cambios en la carga de sedimentos y concentraciones de nutrientes, sales, metales y agroquímicos, la afluencia de patógenos y un cambio en el régimen de temperatura (Kiersch, 2002). Estos contaminantes no tienen la misma importancia a una escala local que a una global (Tabla 1) (Meybeck, Kimstach y Helmer, 1996).

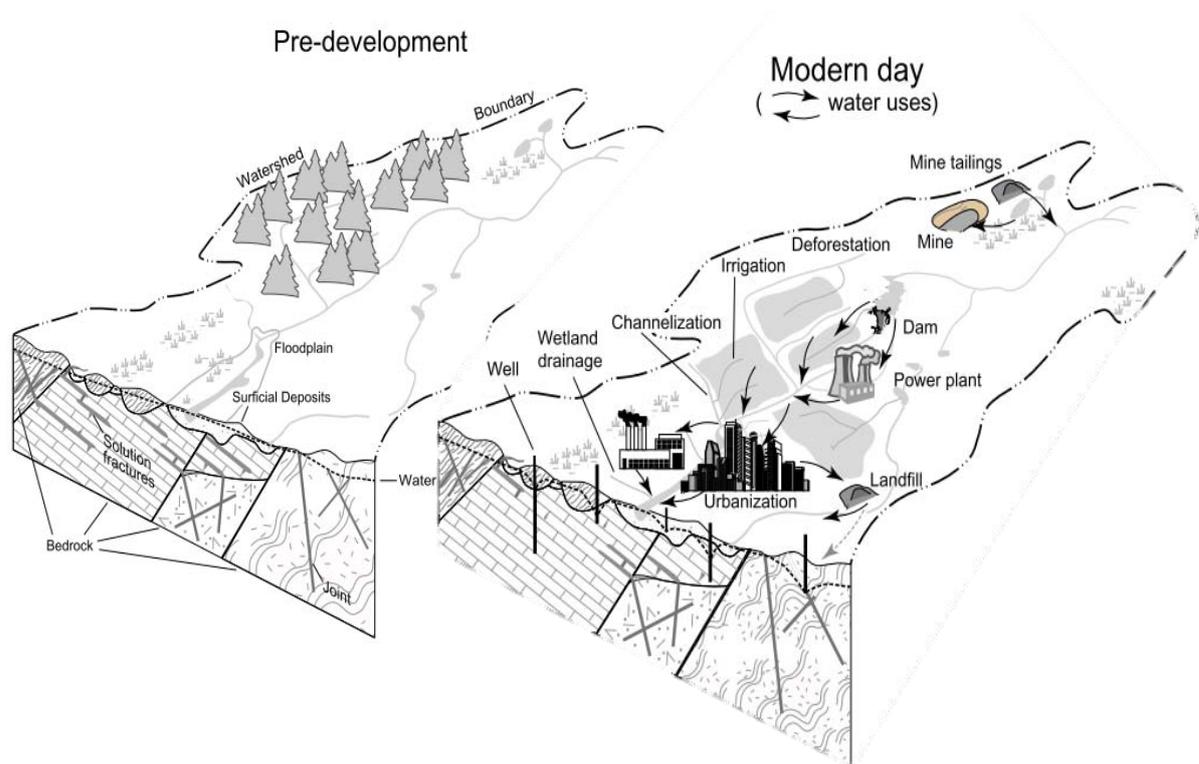


Figura 7. Ejemplo de algunas alteraciones a la ruta del ciclo hidrológico causadas por actividades humanas. Fuente: Peter y Meybeck (2000)

Tabla 1. Fuentes antropogénicas contaminantes del ambiente acuático.

Fuente	Bacterias	Nutrientes	Pesticidas/ herbicidas	Contaminantes industriales micro- orgánicos
Atmósfera		X	XXXG	XXXG
<b>Fuentes puntuales</b>				
Aguas residuales	XXX	XXX	X	XXX
Efluentes industriales		X		XXXG
<b>Fuentes difusas</b>				
Agricultura	XX	XXX	XXXG	
Material disperso		X	XX	XXX
Navegación y puertos	X	X		X
<b>Fuente indistinta</b>				
Escorrentía urbana y depósitos de residuos urbanos	XX	XXX	XX	XX
Sitios de residuos industriales		X	X	XXX

X= baja importancia local; XX= moderada importancia local y regional; XXX= alta importancia local y regional; XXXG= importancia global. Fuente: Modificado de Meybeck y Helmer (1996)

Para muchos problemas de calidad del agua, la escala espacial está vinculada a la escala temporal, ya que las vías hidrológicas cortas (locales) pueden liberar sustancias a las aguas superficiales más rápido que las vías largas (regionales) (Peters y Meybeck, 2000).

La escala temporal constituye otro importante aspecto de los impactos del uso de la tierra en la calidad del agua, ya que determina la percepción del impacto, así como el costo económico asociado a éste. Es importante considerar dos aspectos con respecto a la escala temporal de los impactos en el agua derivados del uso de la tierra: en primer lugar, el tiempo que transcurre antes de que un uso de la tierra tenga un impacto sobre los recursos en la cuenca baja, y, en segundo lugar, en el caso de impactos negativos, el tiempo que necesitan las medidas correctoras para tener efecto, si el impacto es reversible (Kiersch, 2002).

Las escalas temporales dependiendo del impacto, pueden variar desde menos de un año, como en el caso de la contaminación bacteriológica, a cientos de años, como en el caso de la salinidad. De forma similar, las escalas temporales de recuperación de

fenómenos adversos son muy diversas, dependiendo del suceso (Tabla 2). En la mayor parte de los casos, el tiempo que lleva restaurar un sistema acuático después de un impacto adverso es mucho mayor que el tiempo que tarda en producirse (Peters y Meybeck, 2000; Kiersch, 2002).

Para establecer vínculos entre aguas arriba y aguas abajo, es importante tener una idea clara de los posibles impactos del uso del suelo tanto en el régimen hidrológico (disponibilidad de agua) como en la calidad del agua, y las escalas en las que estos impactos son relevantes y remediabiles (Kiersch, 2002).

Por ejemplo, los tipos de fertilizantes que se disuelve rápidamente y se transporta verticalmente a través del suelo hacia el agua subterránea, que se mueve más lentamente que las corrientes superficiales que lleva el fertilizante disuelto a una corriente de agua. Sin embargo, el fertilizante aplicado al suelo más cercano de la corriente tiene mayor posibilidad de ser movilizado rápidamente a la misma. Pero eventualmente, incluso el agua subterránea enriquecida, que es la ruta hidrológica más larga, se descargará a la superficie del agua y se presentarán sus efectos en algún momento del tiempo (Norman Peters y Meybeck, 2000).

Tabla 2. Restricciones espaciales y temporales de la evolución de la calidad del agua

Principales causas/ problemas	Principales problemas relacionados	Escala espacial	Escala temporal (años)		Principales factores de control	
			Contaminación	Recuperación	Biofísicos	Humanos
Población	Patógenos	Local	<1	<1		Densidad y tratamiento
	Eutroficación*	Regional	<1-10	1-100		Tratamiento
	Micro contaminantes	Regional	<1-10	1-100		Varios
Manejo del agua <sup>1</sup>	Eutroficación	Regional	<1	10- > 100	Hidrodinámica	Flujo
	Salinización	Regional	10-100	10- > 100		Balance de agua
	Parásitos	Regional	1-10	>100		Hidrología
Manejo de la tierra	Pesticidas	Local-regional	<1	1-100		Agroquímicos
	Nutrientes (NO <sub>3</sub> )	Local-regional	10-100	>10		Fertilizantes
	Sólidos suspendidos*	Local-regional	<1-10	10-100		Construcción/deforestación
	Cambios físicos	Local	<1-10	>100		Agricultura, minería, construcción y deforestación
Grandes ciudades	Patógenos	Local	<1			Población y tratamiento
	Micro contaminantes	Local-regional	<1			
Minas	Salinización	Local-regional	10-100			Tipos de minas
	Metales	Local-regional	<1			
Cambio climático	Salinización	Global	>10	>100	Temperatura y precipitación	Emisión de combustibles fósiles y emisiones de gases invernadero
Condiciones geoquímicas naturales	Sales	Regional	Permanente	Permanente	Clima y litología	
	Flúor**	Local-regional				
	Arsénico**, metales**	Local-regional				

Notas: \* Es relevante principalmente para aguas superficiales y \*\* es relevante principalmente para aguas subterráneas.

Escalas temporales: local - < 10,000 Km<sup>2</sup>; regional – 10<sup>5</sup> a 10<sup>6</sup> Km<sup>2</sup>; global - 10<sup>7</sup> a 10<sup>8</sup> Km<sup>2</sup>

<sup>1</sup> escala de tiempo más grande corresponde a agua subterránea, seguida por lagos, y la menor para ríos y corrientes. Fuente: Modificada de Peters y Meybeck (2000).

## UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Las microcuencas estudiadas se encuentran en el oriente de Michoacán, entre las coordenadas 19° 49' 58" y 19° 19' 17" de latitud Norte y 100° 11' 50" y 100°26' 24" de longitud Oeste. Ocupan parte de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca y contribuyen a la captación pluvial y la recarga de acuíferos de los dos principales sistemas hidrográficos del país: la subcuenca Lerma-Toluca (cuenca del Río Lerma) y la subcuenca Cutzamala (cuenca del Río Balsas) (INECC, 1996) (Fig. 8).

El área de estudio forma parte de la provincia fisiográfica del Eje Volcánico Transversal, compuesto de un conjunto de sierras y lomeríos con altitudes que varían de los 2 400 a 3 600 msnm. Predominan los bosques de coníferas dominados por Oyamel (*Abies religiosa*), Pino (*Pinus* spp.) y Encino (*Quercus* spp.) en las partes más altas y medias, y continua una transición de bosque a agricultura de temporal y riego. A lo largo de todo el gradiente altitudinal se encuentran llanos y claros donde se lleva a cabo pastoreo de ganado vacuno u ovino (CONANP, 2001; Navarrete, Ramírez y Pérez-Salicrup, 2011).

Estas sierras se conforma principalmente por rocas de origen volcánico de distintos grados de acidéz (basaltos, brecha volcánica, tobas, andesitas, brechas sedimentarias, volcanoclastos, dacitas) (INECC, 1996; Ramírez, 2001). En cuanto a los principales grupos de suelo, se encuentran los andosoles, luvisoles, acrisoles, feozem y litosoles (Velázquez y Larrazábal, 2006).

Se utilizaron los datos de 27 puntos de monitoreo distribuido dentro de la zona núcleo, zona de amortiguamiento y zona de influencia de la RBMM. Estos sitios muestreados se ubican sobre 15 arroyos superficiales (Los Tubos, El Salto, Agua Caliente-Zapatero, Los Filtros, Los Ailes, Río Oscuro, Arroyo Casa Grande, La Segundita, Xorejé, Tamejé, Remunrejé, La Entrada, El Agua de Benita, La Presa y El Establo Poza 8) y 12 manantiales (Palo Amargoso, La Lomita, La Mina, La Capilla, Ojo de Agua 1, Ojo de Agua 2, Manantial Primera Manzana, Ojo de Agua del Aguacate, Ojo de Agua de San Juan Zitácuaro, Villalobos Poza 1, Villalobos Poza 8 y El Establo Poza 6) elegidos por la RMCA-RBMM.

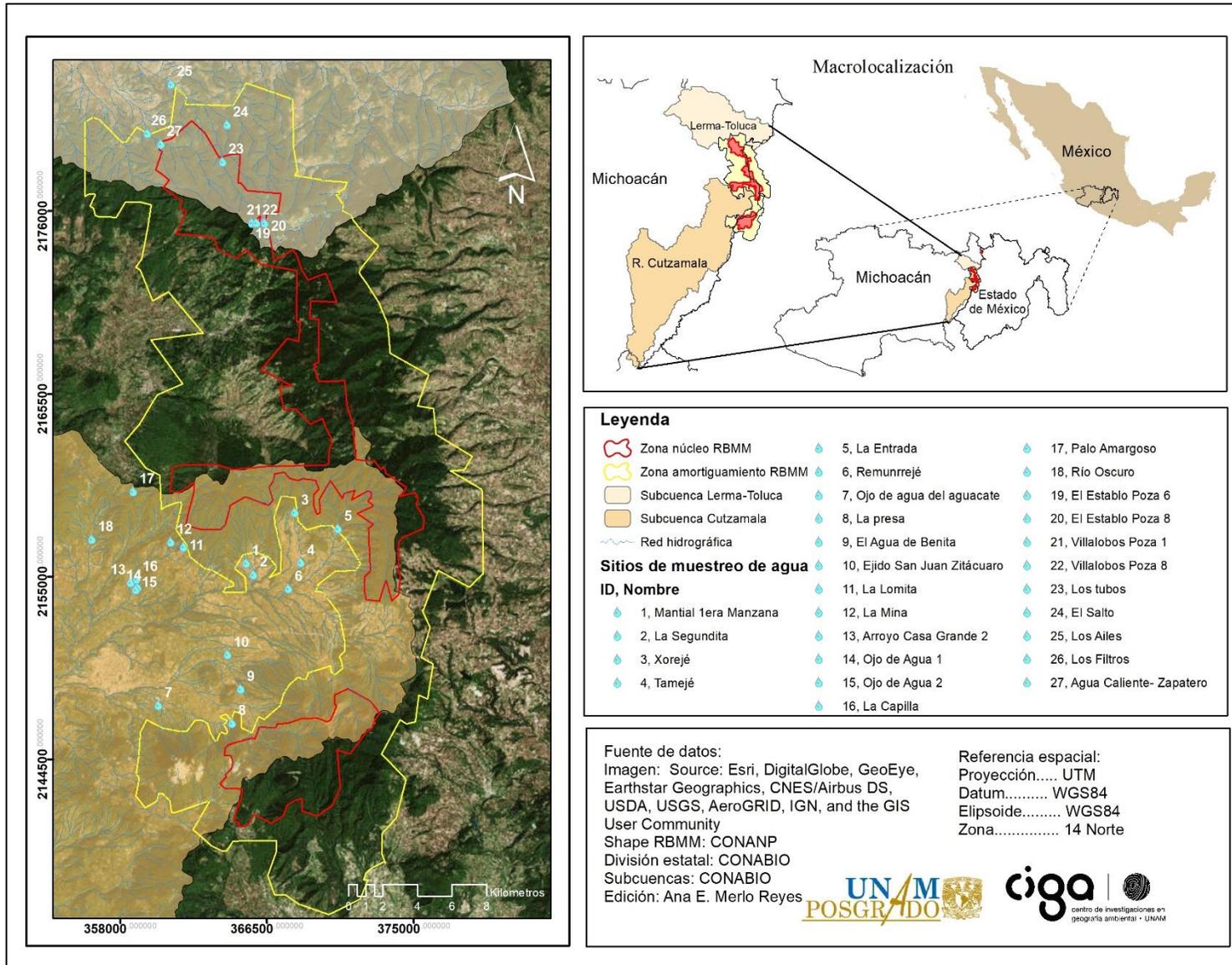


Figura 8. Mapa de ubicación geográfica

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Delimitación de microcuencas

Para la delimitación de microcuencas en la Figura 9 se muestra el proceso semiautomático que se siguió, utilizando el Modelo Digital de Elevación (MDE) de 15 m de resolución del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y diferentes herramientas de la caja de procesamiento hidrológico de ArcGis 10.5.

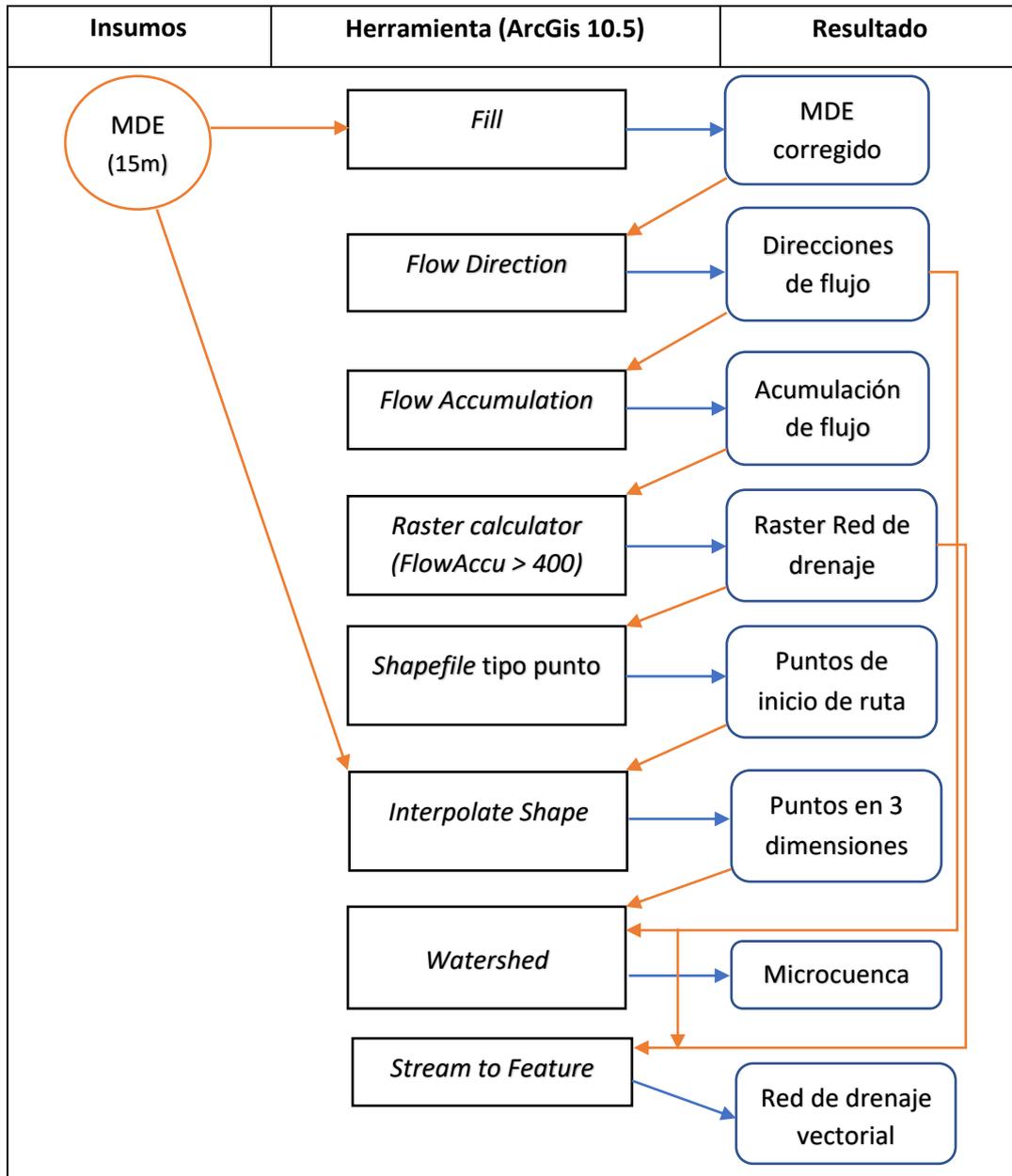


Figura 9. Método para la delimitación de microcuencas.

## Reclasificación de las cubiertas de suelo

El mapa de la serie de Cubiertas del Suelo de la RBMM actualizado al 2015 (Ramírez et al., 2007, Ramírez et al., 2015), y verificado al 2017 mediante interpretación visual 1:40 000 de imágenes de Google Earth (2015-2017) y Sentinel 2-A (2017) y recorridos de campo fueron los insumos utilizados para la reclasificación.

Las microcuencas previamente delimitadas, se sobrepusieron con el mapa de cubiertas y se realizó el recorte para obtener clases de cubierta solo del área de interés. Respetando el área mínima cartografiable de 4x4mm (Salitchev, 1979), los polígonos que quedaron en el contorno de las microcuencas con áreas menores a 0.076 km<sup>2</sup> se fusionaron con su vecino cercano de mayor área.

De las 25 clases de cubiertas con las que cuenta el mapa, 15 están representadas en las cuencas de estudio y sólo en siete de ellas se distribuyen los puntos de muestreo (Tabla 3). Las salidas de campo para la toma de muestras de agua también incluyeron la verificación de las cubiertas y usos del suelo, la cual consistió en su observación y registro durante el trayecto hacia cada sitio de muestreo, lo mismo para el área circundante de cada punto.

Las clases del mapa de cubiertas fueron agrupadas para generar 6 categorías, que agrupan las clases destinadas a un mismo uso tomando algunos criterios de agrupación del sistema jerárquico publicado por Velázquez et al., (2002) como formación “Cultivos” y “Bosques” (Tabla 4). De la misma manera, Bu et al. (2014) y Ding et al. (2015) desarrollan esta reclasificación en sus estudios donde analizan la relación entre los usos del suelo y la calidad del agua.

Tabla 3. Cubiertas del suelo de la RBMM (2015) para las microcuencas y sitios de estudio.

Microcuencas	Cubiertas del suelo en la cuenca	Sitios de muestreo (ID)	Cubiertas del suelo en el sitio
Senguio	Agricultura de regadío y de temporal, Agua, Arbustos secundarios, Oyamel, Oyamel Abierto, Pastizal Inducido, Pino-encino, Pino-encino abierto, pino-encino fragmentado y Urbano.	Los Tubos (CH-1) El Salto (TU-1) Agua Caliente -Zapatero (SE-1) Los Filtros (SE-2) Los Ailes (SE-3)	Pino-encino Pino-encino Pino-encino Pino-encino ab. Ag. de temporal
Palo Amargoso	Agricultura de invernadero, de temporal, de regadío, Agricultura-bosque, Agua, Arbustos secundarios, Pastizal inducido, Pino-encino, Pino-encino abierto, Pino-encino fragmentado, Plantaciones arbóreas y Urbano	Río Oscuro (SFA-3) Palo Amargoso (SFA-1)	Plantaciones arbóreas Pino-encino abierto
La Mina	Agricultura de regadío y de temporal, Agricultura-bosque-urbano, Arbustos secundarios, Oyamel, Oyamel abierto, Pastizal inducido, Pino-encino, Pino-encino fragmentado y Plantaciones arbóreas.	La Lomita (CAR-1) La Mina (CAR-2) La Capilla (CU-2) Ojo de agua 1 (CU-3) Ojo de agua 2 (CU-4) Arroyo Casa Grande (CU-5)	Pino-encino P. arbóreas Ag-bosque-urb <sup>1</sup> Ag-bosque-urb <sup>1</sup> Ag-bosque-urb <sup>1</sup> Ag. de regadío
La Segundita	Agricultura de regadío y de temporal, Arbustos secundarios, Oyamel, Oyamel abierto, Pastizal inducido, Pino-encino, Pino-encino abierto y Pino-encino fragmentado.	Manantial 1era Manzana (DO-1) La Segundita (DO-2)	Ag. de regadío Ag. de regadío
Remunrrejé	Agricultura de regadío y de temporal, Agricultura-bosque, Arbustos secundarios, Oyamel, Oyamel abierto, Pastizal inducido, Pino-encino, Pino-encino abierto y Plantaciones arbóreas.	Xorejé (FS-1) Tamejé (FS-2) Remunrrejé (FS-3) La Entrada (CM-1)	Pino-encino Ag. temporal Ag. temporal Agricultura de temporal
Zitácuaro	Agricultura de temporal, Agricultura-bosque-urbano, Arbustos secundarios, Oyamel, Pastizal inducido, Pino-encino, Pino-encino abierto, Plantaciones arbóreas y Urbano.	Ojo de agua del Aguacate (SJZ-1) El agua de Benita (NR-2) Ojo de agua de San Juan (SJZ-2) La Presa (NR-1)	P. arbóreas P. arbóreas Plantaciones arbóreas Pino-encino
Del Llano	Agricultura de temporal, Arbustos secundarios, Oyamel, Oyamel abierto y Pastizal inducido.	Villalobos poza 1 (CP-2) Villalobos poza 8 (CP-4) El Establo Poza 6 (CP-1) El Establo Poza 8 (CP-3)	Pastizal inducido Pastizal inducido Pastizal inducido Pastizal inducido

<sup>1</sup>Plantaciones arbóreas su categorización final, con base en la verificación con imágenes satelitales.

Tabla 4. Categorías de usos y cubiertas del suelo para microcuencas del oriente de Michoacán

Categorías	Cubiertas dentro de las categorías
Forestal	Oyamel, Oyamel abierto <sup>1</sup> , Pino-encino, Pino-encino abierto, Pino-encino fragmentado <sup>2</sup> , arbustos secundarios, Agricultura-bosque-urbano y Agricultura-bosque.
Agrícola	Agricultura de temporal, Agricultura de regadío, Agricultura de invernadero y Agricultura-bosque-urbano y Agricultura-bosque.
Ganadería extensiva	Pastizal
Plantaciones arbóreas	Plantaciones arbóreas (Aguacate, durazno, guayaba)
Sin vegetación aparente	Sin vegetación aparente
Urbano	Urbano y Agricultura-bosque-urbano

<sup>1</sup>Abierto: árboles que no se tocan entre sí pero que cubren por lo menos 40% de la superficie (Ramírez, 2001).

<sup>2</sup>Fragmentado: árboles que se encuentran afectados por actividades agropecuarias al grado de quedar solo manchones homogéneos (Ramírez, 2001).

#### Evaluación espacio - temporal de los parámetros de calidad del agua

Fuente de datos de calidad del agua y muestreo

La base de datos de 32 sitios de monitoreo de la calidad del agua comprende 18 parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos, fue obtenida de la validación que realiza el LASA-CIGA para la RMCA de la RBMM. Esta validación consiste en analizar los parámetros de calidad del agua con equipo especializado de campo y laboratorio, para corroborar los resultados del muestreo en campo, el cual es mensual y con técnicas sencillas que permiten la participación comunitaria.

La colecta de muestras se realiza en dos temporadas del año, una después del inicio de la temporada de lluvias (septiembre) y otra en estiaje (abril). La base de datos comprende un periodo de seis años de mediciones, que inició en 2011. Aunque para el año 2015 los sitios monitoreados sumaban 32, los activos eran 29, de los cuales solo 19 tienen seis años de datos completos (2011-2017) ya que dos sitios se dejaron de monitorear por conflictos territoriales y por accesibilidad, y los ocho sitios restantes fueron agregados al monitoreo en el año 2015.

Los parámetros que la RMCA-RBMM toma en campo son 9 (pH, alcalinidad, dureza, turbidez, oxígeno disuelto, temperatura del agua, temperatura del aire, coliformes fecales y coliformes de

vida libre). En el laboratorio la base de datos es más amplia y se analizan 9 parámetros más que en campo. Los parámetros analizados en laboratorio son: pH, alcalinidad, dureza, oxígeno disuelto, turbidez, conductividad eléctrica, aniones (cloruros, fluoruros, nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos), cationes (calcio, sodio, potasio y magnesio), coliformes fecales y otros coliformes. En el muestreo de lluvias del 2016 y en el de secas 2017 además se analizaron: sólidos disueltos totales (SDT), SST, DBO<sub>5</sub>, DQO y caudal. Solo para la temporada de estiaje del 2017: nitrógeno total (NT) y fósforo total (FT). Estos parámetros adicionales se agregaron para tener las primeras mediciones, y analizar sus concentraciones para con base en los resultados considerar la posible incorporación en análisis futuros.

La toma y preservación de las muestras se llevaron a cabo respetando los lineamientos de la Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002. Los parámetros de calidad del agua, sus unidades y métodos de análisis están descritos en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de calidad del agua, unidades y métodos analíticos en laboratorio usados durante el periodo 2011-2017 para sitios de la RMCCA-RBMM.

Parámetros	Abreviaturas	Unidades	Métodos analíticos
Potencial de Hidrogeno	pH	Unidades de pH	Potenciométrico NMX-AA-008-SCFI-2001
Alcalinidad	Alc.	mg/l CaCO <sub>3</sub>	Volumétrico. Metrohm 848 Titrino Plus NMX-AA-036-SCFI-2001
Dureza	Dza.	mg/l CaCO <sub>3</sub>	Volumétrico con base en NMX-AA-072-SCFI-2001
Oxígeno disuelto	OD	mg/l	Electrométrico con base en NMX-AA-012-SCFI-2001
Turbidez	Tbz.	UTN	Nefelométrico. Turbidímetro HACH 2100 N NMX-AA-038-SCFI-2001
Conductividad eléctrica	CE	μS/cm	Potenciométrico NMX-AA-093-SCFI-2000
Cloruro, Fluoruro, Nitritos, Nitratos, Sulfatos y Fosfatos	Cl <sup>-</sup> , Fl <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> y PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/l	Cromatográfico. Cromatógrafo iónico Metrohm 883 Basic IC plus. Método proporcionado por Metrohm y EPA 300.1
Sodio, Potasio, Magnesio y Calcio	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , Mg <sup>+</sup> y Ca <sup>+</sup>	mg/l	Cromatográfico. Cromatógrafo iónico Metrohm 883 Basic IC plus. Método proporcionado por Metrohm y EPA 300.1
Coliformes Fecales ( <i>Escherichia coli</i> )	Col.Fec ( <i>E. coli</i> )	UFC/100 ml	Método de filtración en membrana con base en la NMX-AA-102-SCFI-2006
Coliformes termotolerantes	Col.Tot	UFC/100 ml	Método de filtración en membrana con base en la NMX-AA-102-SCFI-2006

Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	Espectrofotométrico UV/VIS Jenway 6405
Demanda Bioquímica de Oxígeno <sub>5</sub>	DBO <sub>5</sub>	mg/l	Método 5 días por incubación a 20°C con Medidor OXITOP™ IS6, IS12, IS12-6, WTW
Sólidos suspendidos Totales	SST	mg/l	Gravimétrico. Con base en NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l	Conductimétrico con multiparámetro de campo.
Nitrógeno Total	NT	mg/l	Espectrofotométrico. UV/VIS HACH DR 5000
Fósforo total	FT	mg/l	Espectrofotométrico. UV/VIS HACH DR 5000
Caudal	Q	m <sup>3</sup> /s	Método con molinete hidrométrico propuesto por la FAO.

UTN: Unidad de Turbidez Nefelométrica

UFC: Unidades Formadoras de Colonias

#### Variaciones espaciales y temporales de los parámetros de calidad el agua

Para determinar la normalidad de los datos de calidad del agua, estos se sometieron a la prueba de Shapiro-Wilks ( $p < 0.05$ ), por su poder de detección superior a otras pruebas generales (Arcones y Whang, 2006; Pedrosa et al., 2014), independientemente del tamaño de muestra que se tenga (Razali y Wah, 2011; Pedrosa et al., 2014). Debido a que no todos los parámetros de calidad del agua (Tabla 6) presentan normalidad en los datos, la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis fue usada para determinar la variación espacial y temporal de los sitios. Identificando si los parámetros diferían significativamente entre las temporadas de lluvias y secas (variación temporal), así como evidenciar diferencias entre los sitios de muestreo (variación espacial).

Tabla 6. Prueba de normalidad Shapiro – Wilk ( $p < 0.05$ )

Parámetro	Estadístico	Sig.
pH	.945	.561
Alcalinidad	.871	.066
Dureza	.931	.390
Oxígeno Disuelto	.918	.271
Conductividad eléctrica	.760	.003
Turbidez	.748	.003
<i>E. coli</i>	.546	.000
Col. Totales	.527	.000
N – Nitratos	.872	.070
Fosfatos	.843	.030
Sulfatos	.899	.155
Cloruros	.968	.888
Fluoruros	.544	.000
Calcio	.975	.957
Sodio	.808	.012
Potasio	.935	.434
Magnesio	.952	.660

Cuando los resultados mostraron diferencias significativas en al menos un par de sitios, se aplicó la prueba *post-hoc* de comparaciones por pares de Dunn con corrección de Bonferroni. Esta prueba ayudó a conocer los pares de sitios que difieren entre sí dentro de cada microcuenca, y mostrar de esta manera los sitios más relevantes y los que mantienen características similares, la corrección de Bonferroni compensa el aumento de  $p < 0.05$  hecho en cada par de pruebas (Napierala y Matthew, 2012).

Identificación de parámetros y sitios clave para cada microcuenca

Con base en los resultados de la prueba Kruskal-Wallis, se detectaron diferencias significativas entre las temporadas de muestreo para cada microcuenca, para las que presentan diferencias se corrió la prueba *post-hoc* a la prueba K-W y se detectaron a través de múltiples comparaciones por pares, los parámetros significativos en cada microcuenca. Para detectar los pares de sitios que tengan las mayores diferencias entre sí, se aplicó el mismo método, pero en este caso para la K-W que evaluó la variabilidad espacial de los parámetros.

Análisis de la calidad del agua

Evaluar la calidad general de un cuerpo de agua no es una tarea fácil, particularmente cuando diferentes criterios son aplicados a distintos usos del agua (Bordalo, Nilsumranchit y Chalermwat, 2001; Sedeño-Díaz y López-López, 2007). Para México existe normativa nacional e internacional para clasificar los valores de los límites máximos permisibles en parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos para distintos usos del agua. En este estudio se utilizaron los valores designados en la Norma Oficial Mexicana 127 (NOM-127-SSA1-1994) que establece los límites permisibles de calidad para el uso y consumo humano. Para ese mismo uso también se utilizaron algunos valores de parámetros tomados de los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) y de la Guía para la calidad de agua potable de la OMS (2011). En los CE-CCA-001/89 también se encuentran los valores para otros usos del agua, no obstante, para esta primera parte del trabajo solo se utilizarán los de uso y consumo humano, así se mostrará un panorama de cómo está la calidad del agua para este rubro, que es para el que se destinan la mayoría de los sitios de muestro.

En la siguiente parte del análisis de la calidad del agua se utilizó un Índice de calidad del agua (ICA) y se tomaron en cuenta otros usos de los cuerpos de agua como riego agrícola y vida acuática. El ICA ha demostrado ser una herramienta simple y comprensible para los usuarios y

los tomadores de decisiones sobre la calidad y los posibles usos de un cuerpo de agua (Bordalo, Nilsumranchit y Chalermwat, 2001).

El ICA es una herramienta matemática utilizada para transformar grandes cantidades de datos de calidad del agua en un solo número que representa el nivel de calidad del agua (Stambuk-Giljanovic, 1999). Dichos índices agrupan de uno a varios parámetros, en su mayoría fisicoquímicos y en algunos casos microbiológicos, de tal manera que permiten reducir la información a una expresión sencilla y fácil de interpretar (Samboni, Carvajal y Escobar, 2007; Guzmán-Colis *et al.*, 2011; Abbasi y Abbasi, 2012).

La calidad del agua fue evaluada usando el índice ponderado multiplicativo propuesto por Dinius (1987). Se han demostrado que los índices ponderados multiplicativos son superiores a los que solo se basan en una media aritmética, debido a que una media geométrica se ve menos afectada por valores extremos que una media aritmética (Landwehr y Deininger, 1976 y Otto, 1978). Aunado a lo anterior varios estudios en el territorio mexicano y en el extranjero han optado por aplicar el índice de Dinius (1987), ya sea complementándolo con otro índice o modificando parámetros y pesos de ponderación, para adecuarlo a los parámetros disponibles en el estudio, así como al tipo de aguas que se estén analizando (León, 1991; Sedeño-Díaz y López-López, 2007; Páez *et al.*, 2015).

La ecuación del ICA<sub>Dinius</sub> se describe a continuación:

$$ICA = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i}$$

En donde:

ICA es Índice de Calidad de Agua, con valores de 0 a 100

$I_i$  es el subíndice de calidad de cada parámetro, un número de 0 a 100

$W_i$  es el peso asignado a cada parámetro, un número de 0 a 1; y  $\sum_{i=1}^n W_i = 1$

$n$  es el número de parámetros incluidos en el cálculo del ICA

La determinación del ICA requiere de un paso de normalización, empleando los subíndices para cada parámetro, donde son transformados a una escala de 0 a 100. El siguiente paso es aplicar un factor de ponderación, de acuerdo con la importancia del parámetro como indicador de la calidad del agua. Los criterios a seguir para aplicar este factor son principalmente el tipo de agua que se esté analizando (natural o residual) y el uso que se le da a la misma (si es para consumo

humano, regadío, etc.) (Fig.10). Finalmente se realiza una operación multiplicativa de los subíndices elevados al peso de ponderación de cada uno, el resultado que arroja la ecuación es un número entre 0 y 100, a partir del cual califica el grado de contaminación del agua y este responderá en función del uso designado a la misma (Dinius, 1987).

Son seis rangos de calidad del agua propuestos en el estudio de Dinius (1972 y 1987) (Fig. 11). De esta manera, el agua muy contaminada tendrá un índice de calidad cercano a 0, y cercano a 100 para agua de excelentes condiciones, las restricciones dependerán de la legislación ambiental vigente en materia de agua. Para los sitios seleccionados se evaluó el ICA sobre los rangos de calidad para consumo humano, riego agrícola y vida acuática, esto porque se ajusta a los principales usos que tienen los cuerpos de agua dentro de la región de estudio.

En este estudio se modificaron algunos de los parámetros que conforman el ICA propuesto por Dinius (1987), se excluyó la demanda bioquímica de oxígeno y la temperatura por la falta de datos en todas las fechas del muestreo. No obstante, se agregó turbidez, fosfatos y sulfatos. En la Tabla 7 se muestra la lista de parámetros que componen la ecuación, así como los subíndices y pesos de ponderación para cada uno, la cual se contempló de acuerdo con los rangos para aguas naturales para distintos parámetros (Chapman, 1992).

Valor ICA	Uso:	Agua Potable		Agrícola		Pesca y vida acuática
90		No requiere purificación		No requiere purificación		
80		Requiere purificación menor		Purificación menor para cultivos que requieran alta calidad de agua		Pesca y vida acuática abundante
70		Dudoso su consumo sin purificación				
60		Tratamiento de potabilización indispensable		Utilizable en la mayoría de los cultivos		Límite para peces muy sensitivos
50						Dudosa la pesca sin riesgos de salud
40		Dudoso para consumo		Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos		Vida acuática especies muy resistentes
30		Inaceptable para consumo humano			Uso solo en cultivos muy resistentes	
20				Inaceptable para riego		Inaceptable para vida acuática
10						
Escala de calidad del agua						
		E <sup>1</sup>	A <sup>2</sup>	LC <sup>3</sup>	C <sup>4</sup>	FC <sup>5</sup>
						EC <sup>6</sup>

Figura 10. Valores de calificación y categorías generales del ICA en función del uso del agua

Fuente: Dinius (1987) figura adaptada de León (s/f).

Notas: Excelente (E), Aceptable (A), Levemente contaminada (LC), Contaminada (C), Fuertemente contaminada (FC), Excesivamente contaminada (EC).

Nivel de contaminación (descendente)	Usos de agua					
	Consumo humano	Recreación	Peces	Crustáceos	Agricultura	Industria
100	Purificación no necesaria	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Purificación no necesaria	Purificación no necesaria
90	Menor purificación necesaria	para	para	para	Purificación menor para cultivos que requieran alta calidad de agua	Purificación menor para industrias que requieran alta calidad de agua
80		todos los deportes de agua	todos los peces	todos los crustáceos		
70	Tratamiento necesario convirtiéndose más intensivo	Comienza contaminación	Marginal para peces sensibles	Marginal para crustáceos sensibles	Sin tratamiento necesario para la mayoría de los cultivos	Sin tratamiento necesario para la mayoría de las industrias
60		aún aceptable conteo de bacterias	Dudoso para peces sensibles	Dudoso para crustáceos sensibles		
50	Dudoso	Dudoso para el contacto	Peces resistentes solamente	Crustáceos resistentes solamente	Extensivo tratamiento para la mayoría de cultivos	Extensivo tratamiento para la mayoría de industrias
40		Sin contacto con el agua	Solo pescado recreativo resistente	Solo crustáceo recreativo resistente		
30	I N A C E P T A B L E	Contaminación visible	I N A C E P T A B L E	I N A C E P T A B L E	Cultivos muy resistentes	Solo para industrias específicas
20		Obvia contaminación Inaceptable			No Aceptable	No Aceptable
0						

Figura 11. Escala general de rangos para calidad de agua. Modificada de Dinius (1987).

Tabla 7. Parámetros, pesos de ponderación y fórmulas de los subíndices utilizados en el cálculo del ICA.

Parámetro	Subíndice ( $I_i$ )	Peso ( $W_i$ )
Oxígeno disuelto	$OD \geq 7.5$ $OD < 7.5$ $I_{OD} = 100$ $I_{OD} = -4.6067 + 15.008 * OD$	0.109
pH	$pH < 6.7$ $6.7 \leq pH \leq 7.3$ $pH > 7.3$ $I_{pH} = 10^{0.2335 * pH + 0.440}$ $I_{pH} = 100$ $I_{pH} = 10^{3.65 - 0.2216 * pH}$	0.077
Turbidez	$Tbz \leq 2$ $Tbz > 2$ $I_{Tbz} = 100$ $I_{Tbz} = 108 * Tbz^{-0.178}$	0.077
Conductividad eléctrica	$CE \leq 135$ $CE > 135$ $I_{CE} = 100$ $I_{CE} = 506 * CE^{-0.3315}$	0.079
Nitrato	$NO_3 \leq 0.25$ $NO_3 > 0.25$ $I_{NO_3} = 100$ $I_{NO_3} = 62.2 * NO_3^{-0.343}$	0.091
Cloruro	$Cl \leq 21$ $Cl > 21$ $I_{Cl} = 100$ $I_{Cl} = 391 * Cl^{-0.4488}$	0.074
Fosfato	$PO_4 \leq 0.16$ $PO_4 > 0.16$ $I_{PO_4} = 100$ $I_{PO_4} = 34.215 * PO_4^{-0.46}$	0.075
Sulfato	$SO_4 \leq 25$ $SO_4 > 25$ $I_{SO_4} = 100$ $I_{SO_4} = 112 * 10^{-0.002 * SO_4}$	0.075
Dureza total	$Dza \leq 45$ $Dza > 45$ $I_{Dza} = 100$ $I_{Dza} = 552 * Dza^{-0.448}$	0.073
Alcalinidad	$Alc \leq 25$ $Alc > 25$ $I_{Alc} = 100$ $I_{Alc} = 154 * Alc^{-0.1342}$	0.063
Coliformes totales	$I_{ColTot} < 10$ $I_{ColTot} > 10$ $I_{ColTot} = 100$ $I_{ColTot} = 100 * ColTot^{0.1311}$	0.091
Coliformes fecales	$I_{ColFec} < 1$ $I_{ColFec} > 1$ $I_{ColTot} = 100$ $I_{ColTot} = 100 * ColFec^{-0.1286}$	0.116

### Relación entre usos del suelo y calidad del agua

Para determinar la relación de las variables de calidad del agua y las categorías de los usos y cubiertas de suelo, se realizó la correlación no paramétrica de Spearman ( $p < 0.05$ ) (Li et al., 2008; Bu et al., 2014; Ding et al., 2015) en el programa IBM SPSS 22.0. Este estadístico determinó si algún parámetro fisicoquímico o bacteriológico está correlacionado con alguno de los usos del suelo. Las categorías se categorizan con 1 ó 0 dependiendo de donde se distribuye el sitio, en el caso de que el sitio esté entre dos categorías, estas se ponderan con 0.5 cada una.

## RESULTADOS

### Análisis espacial

Delimitación de las microcuencas y distribución de los sitios de monitoreo

La delimitación resultó en siete microcuencas, las cuales presentan gran variación de tamaño debido a las características del terreno. Las microcuencas La Segundita y Palo Amargoso son las más pequeñas, con 9 y 16 km<sup>2</sup> de área respectivamente, así como dos sitios de muestreo cada una. La microcuenca Del Llano y la microcuenca La Mina también tienen áreas pequeñas, 16 km<sup>2</sup> cada una, pero a diferencia de las anteriores en ellas se ubican cuatro y seis sitios de muestreo respectivamente. Por otro lado, las microcuencas más grandes son la de Senguio con 86 km<sup>2</sup>, Zitácuaro con 55 km<sup>2</sup> y Remunrrejé con 40 km<sup>2</sup>.

La distribución de los sitios de muestreo de agua responde a distintos intereses de la RMCA-RBMM, razón por la cual en todas las microcuencas se encuentran con particulares distribuciones independientemente de la configuración altitudinal natural (Tabla 8 y Fig.12).

Tabla 8. Características de las microcuencas y los sitios de monitoreo del oriente de Michoacán.

Microcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Sitios de muestreo (ID)	Latitud (Y)	Longitud (X)	Altitud (m.s.n.m.)	Localidad
Senguio	86.07	Los Tubos (CH-1)	2178866	363943	1937	Ej. Chincua
		El salto (TU-1)	2180991	364205	2744	Ej. Tupátaro
		Agua Caliente -Zapatero (SE-1)	2179872	360368	2519	P.V. Zacatón
		Los Filtros (SE-2)	2180500	359597	2438	Ej. Senguio
		Los Ailes (SE-3)	2183424	361171	2328	P.V. Senguio
Palo Amargoso	16.31	Río oscuro (SFA-3)	2157148	356372	1907	C.I. San Felipe de los Alzati
		Palo amargoso (SFA-1)	2159901	358768	2304	C.I. San Felipe de los Alzati
La Mina	15.87	La Lomita (CAR-1)	2156707	361679	2299	C.I. Carpinteros
		La Mina (CAR-2)	2156993	360937	2177	C.I. Carpinteros
		La Capilla (CU-2)	2154868	358946	1948	C.I. Curungueo
		Ojo de Agua 1 (CU-3)	2154377	359023	1932	C.I. Curungueo
		Ojo de Agua 2 (CU-4)	2154243	358911	1942	C.I. Curungueo
		Arroyo Casa Grande (CU-5)	2154670	358599	1940	C.I. Curungueo
La Segundita	9.39	Manantial 1era Manzana (DO-1)	2155774	365328	2258	C.I. Donaciano Ojeda
		La Segundita (DO-2)	2155128	365736	2207	C.I. Donaciano Ojeda
Remunrrejé	39.67	Xorejé (FS-1)	2158693	368127	2606	C.I. Francisco Serrato
		Tamejé (FS-2)	2155820	368470	2432	C.I. Francisco Serrato
		Remunrrejé (FS-3)	2154312	367761	2331	C.I. Francisco Serrato
		La Entrada (CM-1)	2157760	370635	2490	C.I. Crescencio Morales

Zitácuaro	54.77	Ojo de Agua del Aguacate (SJZ-1)	2147614	360225	2059	Ej. San Juan Zitácuaro
		El agua de Benita (NR-2)	2148555	364986	2345	Nicolás Romero
		Ojo de Agua de San Juan (SJZ-2)	2150525	364235	2266	Ej. San Juan Zitácuaro
		La presa (NR-1)	2146581	364487	2357	Nicolás Romero
Del Llano	16.57	Villalobos Poza 1 (CP-2)	2175355	365645	3243	Ej. Cerro Prieto
		Villalobos Poza 8 (CP-4)	2175350	365897	3242	Ej. Cerro Prieto
		El Establo Poza 6 (CP-1)	2175380	366374	3204	Ej. Cerro Prieto
		El Establo Poza 8 (CP-3)	2175318	366396	3200	Ej. Cerro Prieto

Ej. = Ejido, P.V. = Propiedad Privada, C.I. = Comunidad Indígena.

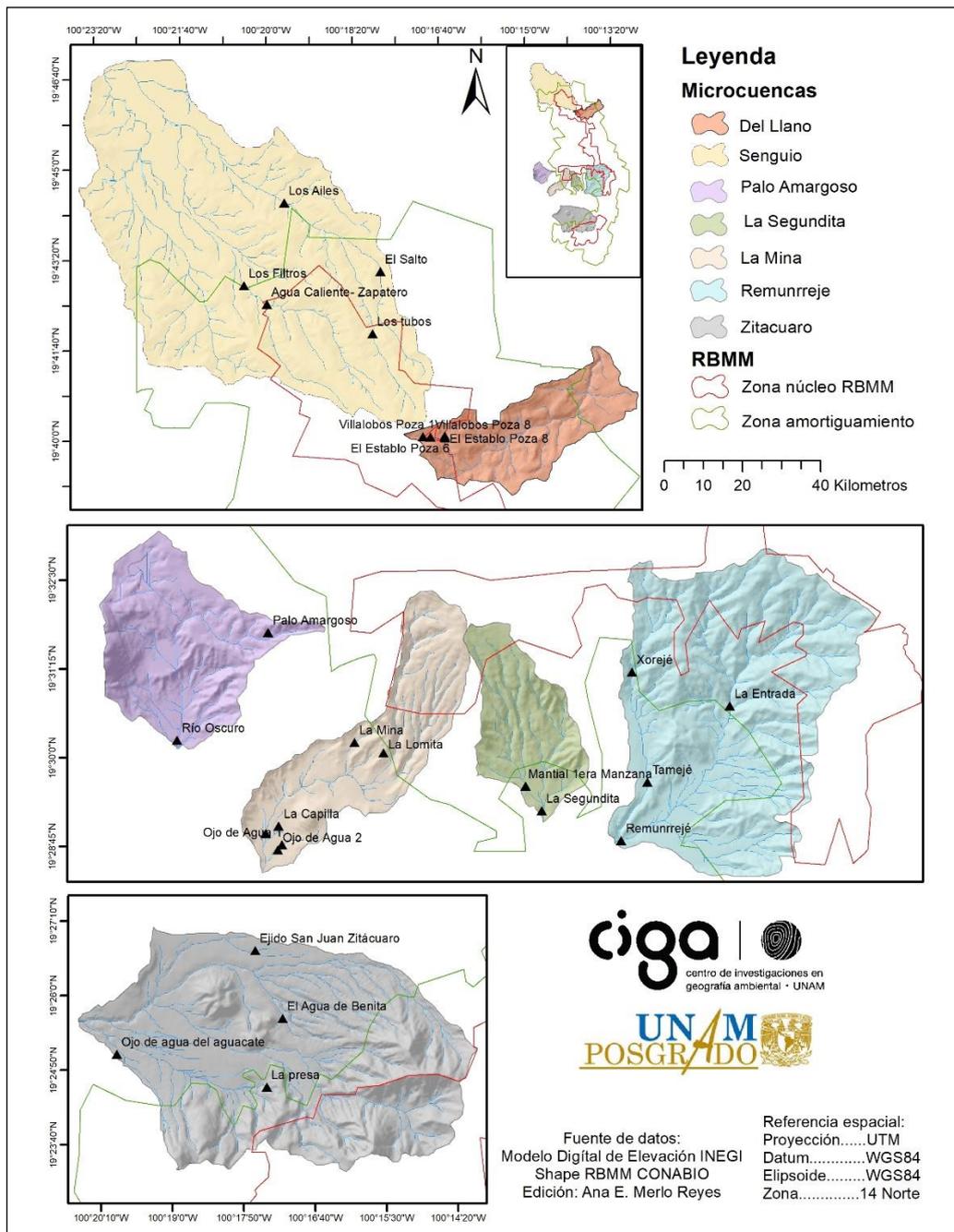


Figura 12. Mapa de distribución de sitios de muestreo y microcuencas en el oriente de Michoacán.

### Categorización espacial

Los usos del suelo para cada microcuenca se presentan en las figuras 13 a 19, las microcuencas de Senguio, Palo Amargoso y Zitácuaro son las que se componen de más de tres usos del suelo, mientras que las cuatro restantes solo mantienen tres o dos usos en toda su área. Los 27 sitios se distribuyen dentro de cuatro de los seis usos del suelo, los dos usos del suelo donde no se encuentra ningún sitio son “urbano” y “sin vegetación aparente” (Tabla 9).

### Distribución de los usos y cubiertas del suelo

En todas las microcuencas de estudio tiene predominancia la cubierta forestal compuesta principalmente de oyamel (*Abies religiosa*) en las partes más altas, pino (*Pinus sp.*), encinos (*Quercus sp.*) y arbustos secundarios en la parte media de la microcuenca. Los porcentajes de esta cubierta van desde el 49% en la microcuenca de Palo Amargoso hasta el 81% para la microcuenca Del Llano.

La ganadería extensiva compuesta por pastizales, abarca pequeños porcentajes de área en las microcuencas de Senguio y Palo Amargoso con 2.47% y 1.78% respectivamente, mientras que para la microcuenca Del Llano se vuelve más considerable con un 16%. Cabe mencionar que en esta microcuenca los pastizales son naturales, pertenecientes al área llana dentro de la zona núcleo de la RBMM; sin embargo, aún en calidad de ANP existe el pastoreo de ganado de autoconsumo dentro de los mismos, una práctica que atenta sobre la calidad del agua y del suelo de la zona.

El uso agrícola compuesto por agricultura de temporal y de regadío está ampliamente distribuido en tres de las siete microcuencas, para la microcuenca Senguio abarca el 37%, en las microcuencas de Remunrejé y La Segundita es la segunda con mayor predominancia, con poco más de un cuarto del total de su área en ambos casos.

En la microcuenca Palo Amargoso el uso agrícola mantiene un porcentaje de 19.3%, esta última microcuenca al igual que la de La Mina y la de Zitácuaro presentan plantaciones arbóreas como segunda cubierta más dominante, compuesta por cultivos perennes (aguacate, guayaba y durazno, entre otros). La cubierta de plantaciones arbóreas abarca el 26.5%, 30.9%, y 39.9% respectivamente para cada microcuenca.

Con pequeños porcentajes de área, pero presentes en tres de las microcuencas, el uso urbano y sin vegetación aparente se enlistan también en la Figura 20.

Tabla 9. Categorías de usos y cubiertas del suelo en microcuencas y sitios de muestreo.

Microcuencas	Categorías en la cuenca	Sitios de muestreo (ID)	Categoría en el sitio
Senguio	Forestal Agrícola Ganadería Extensiva Urbano	Los Tubos (CH-1)	Forestal
		El salto (TU-1)	
		Agua Caliente -Zapatero (SE-1)	
		Los Filtros (SE-2)	
Palo Amargoso	Forestal Agrícola Ganadería Extensiva Plantaciones Arbóreas Sin Vegetación Aparente	Los Ailes (SE-3)	Agrícola
		Río oscuro (SFA-3)	Plantaciones Arbóreas
		Palo amargoso (SFA-1)	Forestal
La Mina	Forestal Agrícola Plantaciones Arbóreas	La Lomita (CAR-1)	Forestal
		La Mina (CAR-2)	Plantaciones Arbóreas
		La capilla (CU-2)	
		Ojo de agua 1 (CU-3)	
		Ojo de agua 2 (CU-4)	
Arroyo Casa Grande (CU-5)	Agrícola		
La Segundita	Forestal Agrícola	Manantial 1era Manzana (DO-1)	Agrícola
		La segundita (DO-2)	
Remunreje	Forestal Agrícola	Xoreje (FS-1)	Forestal
		Tameje (FS-2)	Agrícola
		Remunreje (FS-3)	
		La entrada (CM-1)	
Zitácuaro	Forestal Agrícola Plantaciones Arbóreas Urbano	Ojo de agua del aguacate (SJZ-1)	Plantaciones arbóreas
		El agua de Benita (NR-2)	
		Ojo de agua de San Juan (SJZ-2)	
		La presa (NR-1)	Forestal
Del Llano	Forestal Agrícola Ganadería Extensiva	Villalobos poza 1 (CP-2)	Ganadería Extensiva
		Villalobos poza 8 (CP-4)	
		El Establo Poza 6 (CP-1)	
		El Establo Poza 8 (CP-3)	

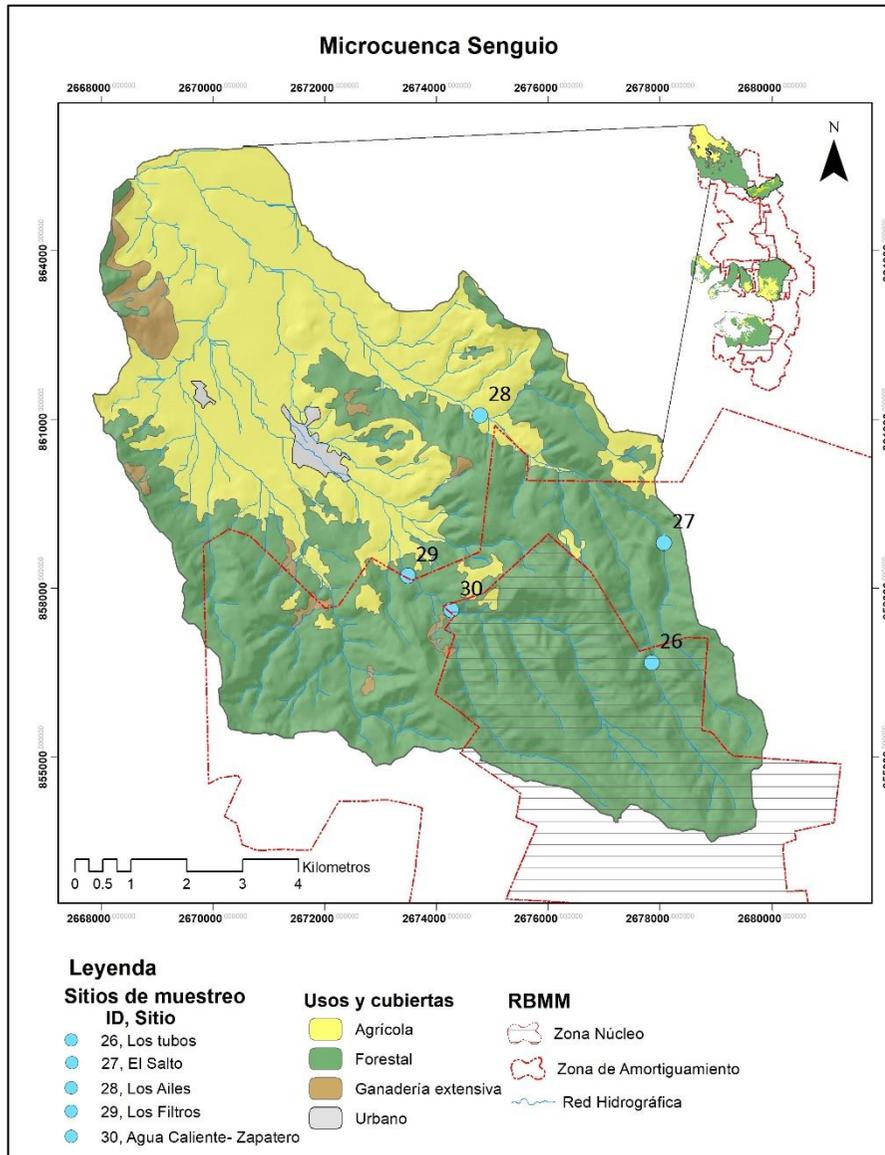


Figura 14. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca Senguio

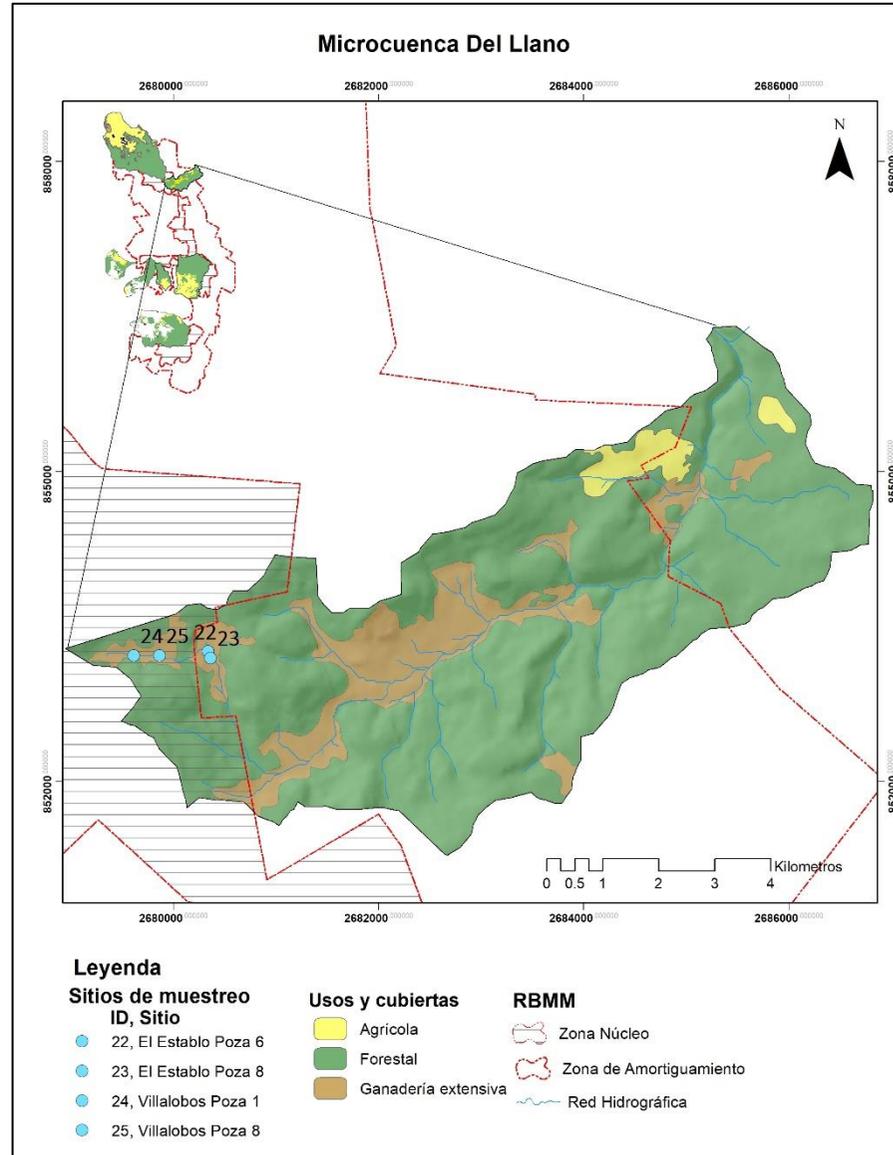


Figura 13. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca Del Llano

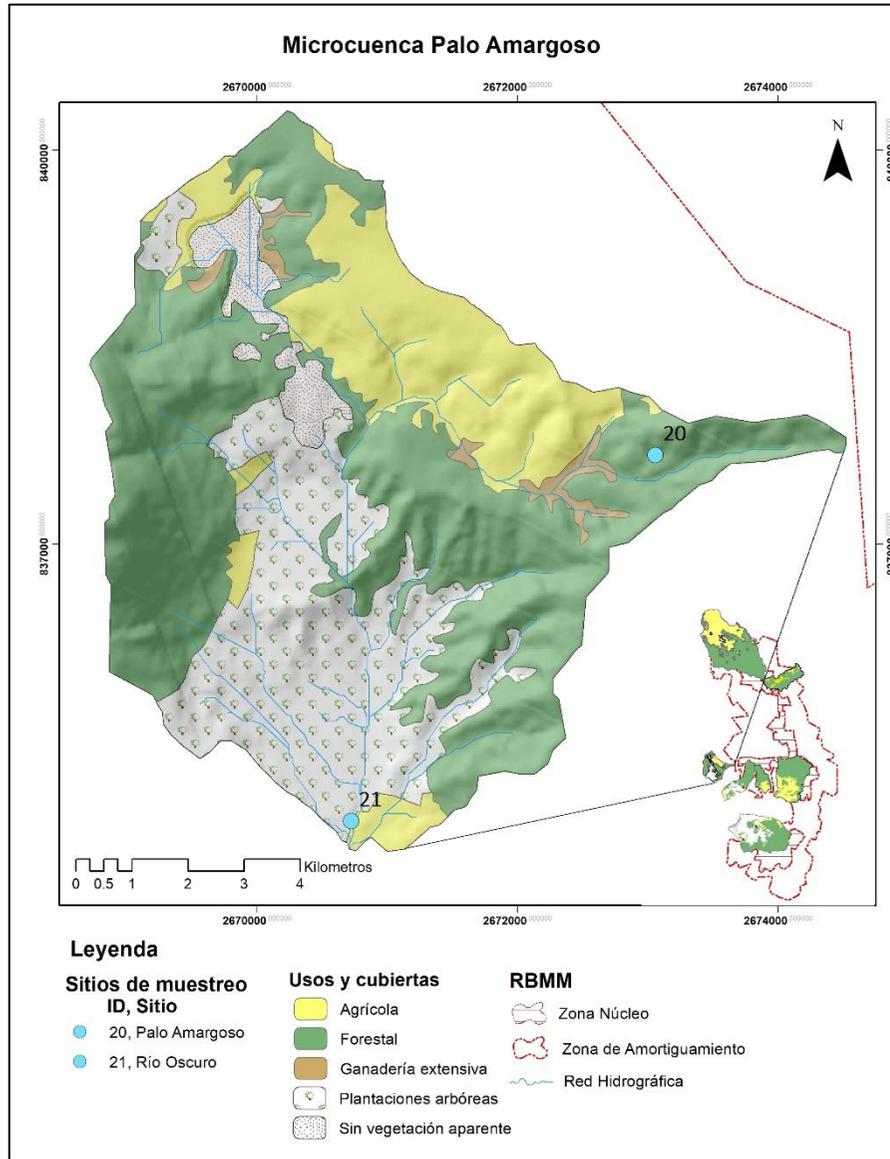


Figura 15. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca Remunreje

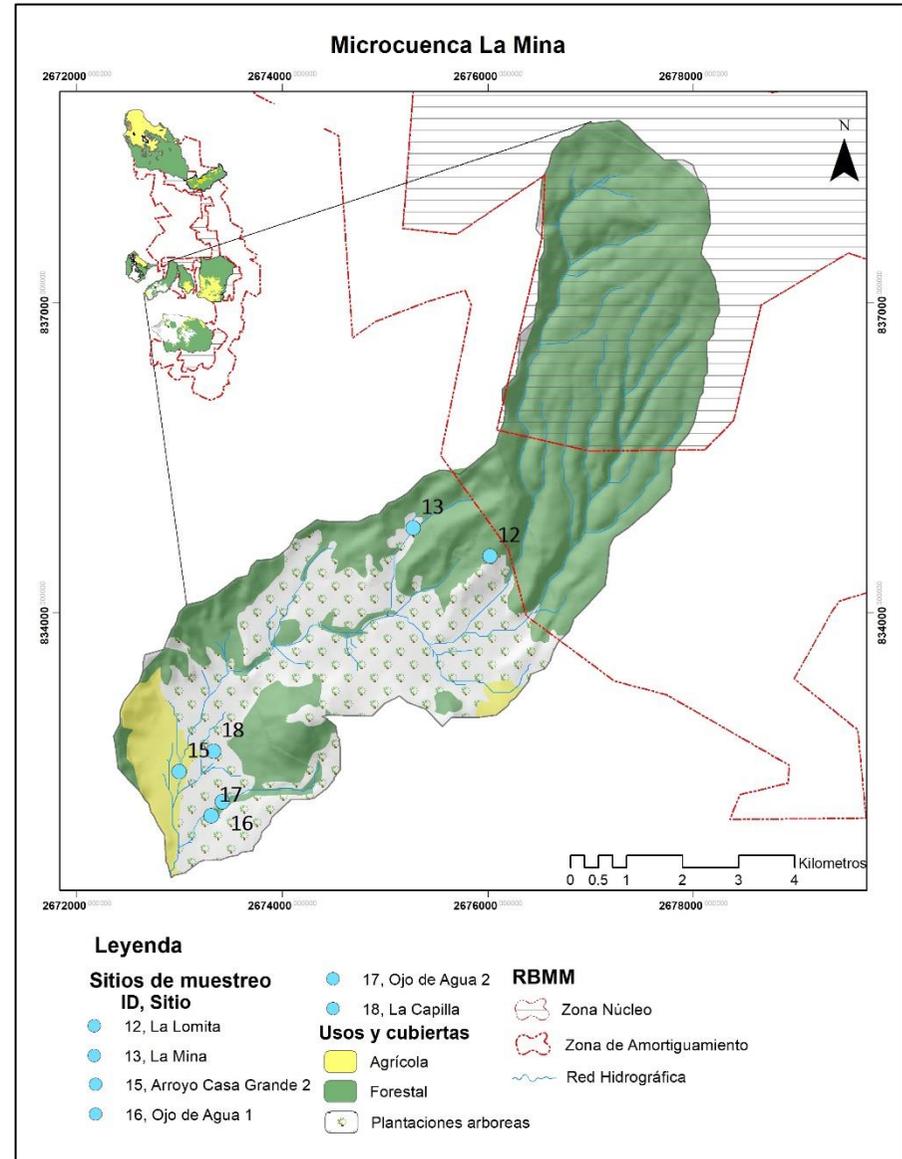


Figura 16. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca La Mina

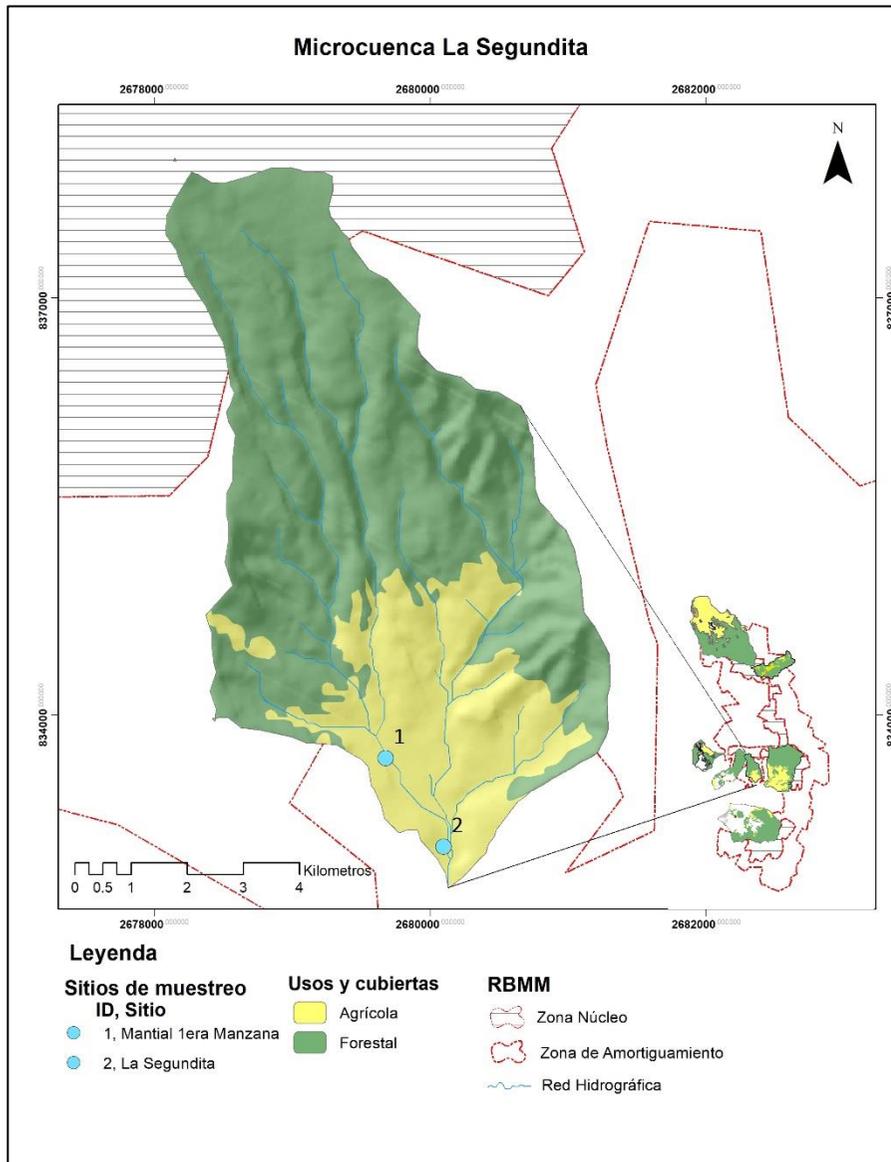


Figura 18. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca La Segundita

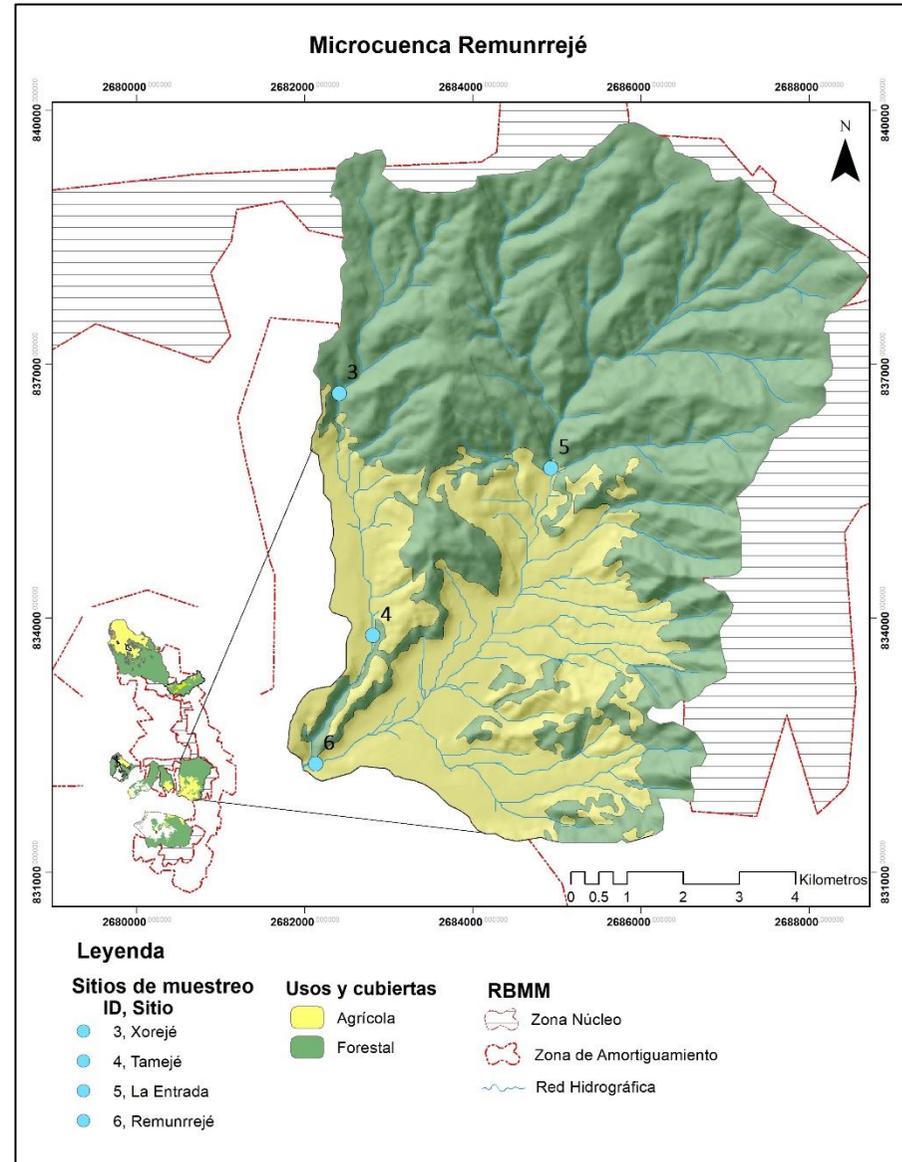


Figura 17. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca Remunreje

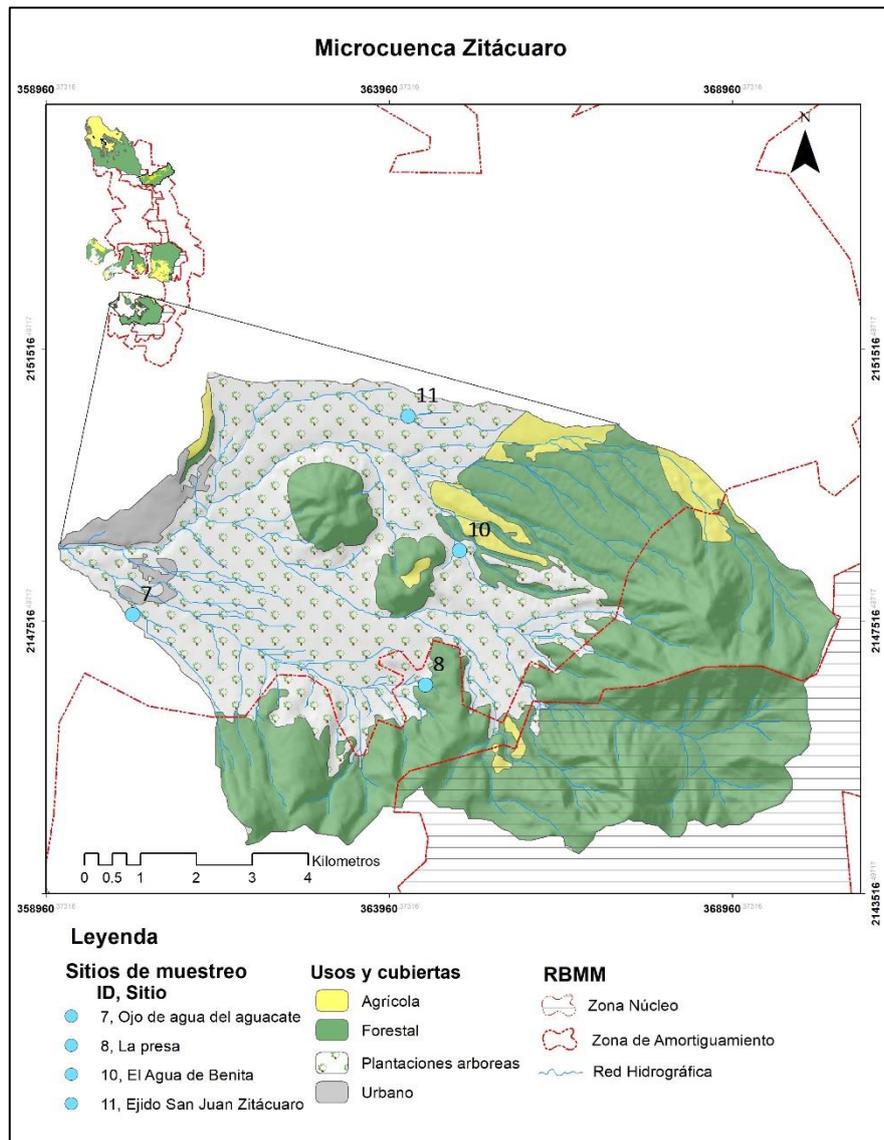


Figura 19. Mapa de usos y cubiertas del suelo dentro de la microcuenca de Zitácuaro

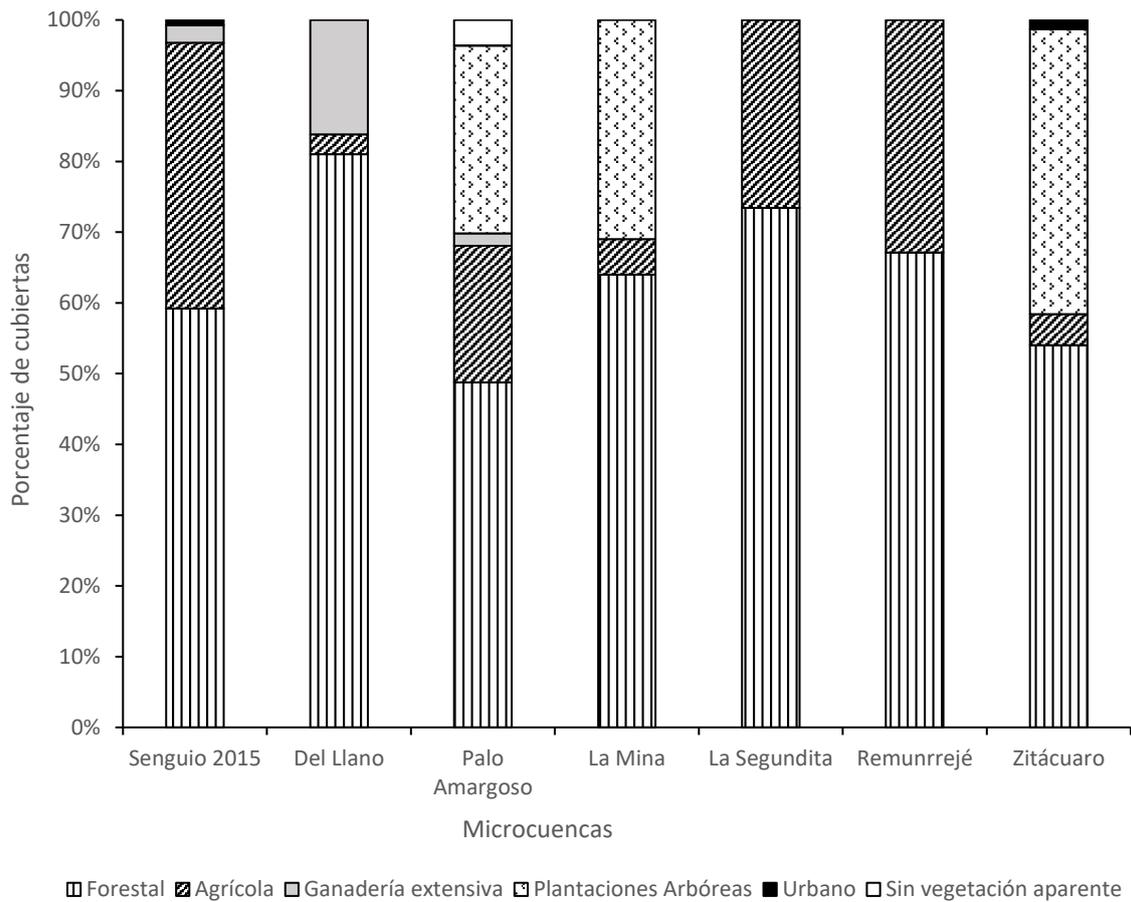


Figura 20. Composición (%) de cubiertas y usos del suelo en siete microcuencas del oriente de Michoacán.

## Evaluación espacio - temporal de los parámetros de calidad del agua

### Variaciones temporales

Las concentraciones de la mayoría de los parámetros evaluados en los sitios de muestreo, durante la temporada de secas y lluvias, dentro del periodo 2011-2017 (Fig.22) no sobrepasan los límites máximos permisibles marcados por la legislación ambiental mexicana e internacional (Tabla 11). Son las coliformes totales y fecales, la turbidez y los fosfatos, los parámetros que sobrepasan los valores establecidos como permisibles para el consumo humano.

Las coliformes fecales y totales se presentan en todas las microcuencas y en ambas temporadas, con grandes variaciones, en algunos sitios las concentraciones son mayores a 5 000 unidades formadoras de colonias (UFC) como es el caso de La Segundita con un rango de 900 – 6 667 UFC en coliformes fecales y de 4 000 – 20 000 UFC en coliformes totales, mientras que otros sitios como Palo amargoso mantienen un rango de 0 – 25 UFC en coliformes fecales y de 7 – 53 UFC en totales (Anexo 1).

Los fosfatos ( $\text{PO}_4^-$ ) en temporada de lluvias, en todos los sitios de todas las microcuencas sobrepasan el máximo permisible marcado por los Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua (CECCA, 1989), sucede lo mismo en temporada de secas a excepción de la microcuenca Remunrrejé y un sitio de la microcuenca La Mina.

La turbidez en temporada de lluvias presenta las mayores concentraciones en cinco de las siete microcuencas; todos los sitios de la microcuenca de Senguio y Remunrrejé, en un sitio de la microcuenca Del Llano, un sitio de la microcuenca de Palo Amargoso y en un sitio de la microcuenca La Segundita sobrepasan las 5 unidades de turbidez nefelométrica, límite máximo permisible para consumo humano (NOM-127-SSA1-1994), los rangos mínimos varían de 0.16 a 0.36, mientras que los máximos en un rango de 5.58 a 110.

En lo que respecta el oxígeno disuelto la concentración mínima que se toma como control de buena calidad es 4 mg/l (CE-CCA-01/89). Solo en un sitio de la microcuenca La Mina en temporada de secas la concentración es menor a 4 mg/l, el cual varía de 3.82 a 7.94 mg/l durante todos los años de monitoreo.

En temporada de estiaje los valores más altos registrados corresponden a la conductividad eléctrica (C.E.), la dureza y la alcalinidad. Sin embargo, estos últimos dos no llegan a rebasar el

valor máximo permisible establecido. La C.E. solo sobrepasa los 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en un sitio de la microcuenca La Mina y en un sitio de la microcuenca Palo Amargoso.

Con base en los resultados de la prueba Kruskal-Wallis ( $p < 0.05$ ), el pH, los coliformes fecales y totales, los sulfatos y el fluoruro se comportan sin variación temporal significativa en todas las microcuencas. Parámetros específicos presentaron diferencias significativas en las siguientes microcuencas: para la microcuenca Senguio los parámetros son, alcalinidad, dureza, oxígeno disuelto, C.E., nitratos, fosfatos, cloruros, potasio, magnesio, calcio y sodio, mientras que para la microcuenca Del Llano son solamente alcalinidad, dureza y C.E. La microcuenca Remunreje presenta diferencias temporales en los siguientes parámetros: dureza, C.E., turbidez, fosfatos, calcio y sodio. Finalmente, la microcuenca Zitacuaro en la turbidez y el sodio (Tabla 12).

Otro de los parámetros que muestra una variabilidad temporal en todos los sitios es el caudal (Fig. 21), el cual en temporada de secas para todos los sitios de muestreo disminuyó y en los sitios de Arroyo Casa Grande, Palo Amargoso, Establo Poza 6, Establo Poza 8, Villalobos Poza 1, Villalobos Poza 8, El Salto y los Ailes desapareció (Tabla 10). Algunos de los sitios -en su mayoría manantiales- no presentan valores de velocidad de flujo. En el Anexo II se muestran fotografías comparativas de cada sitio en ambas temporadas.

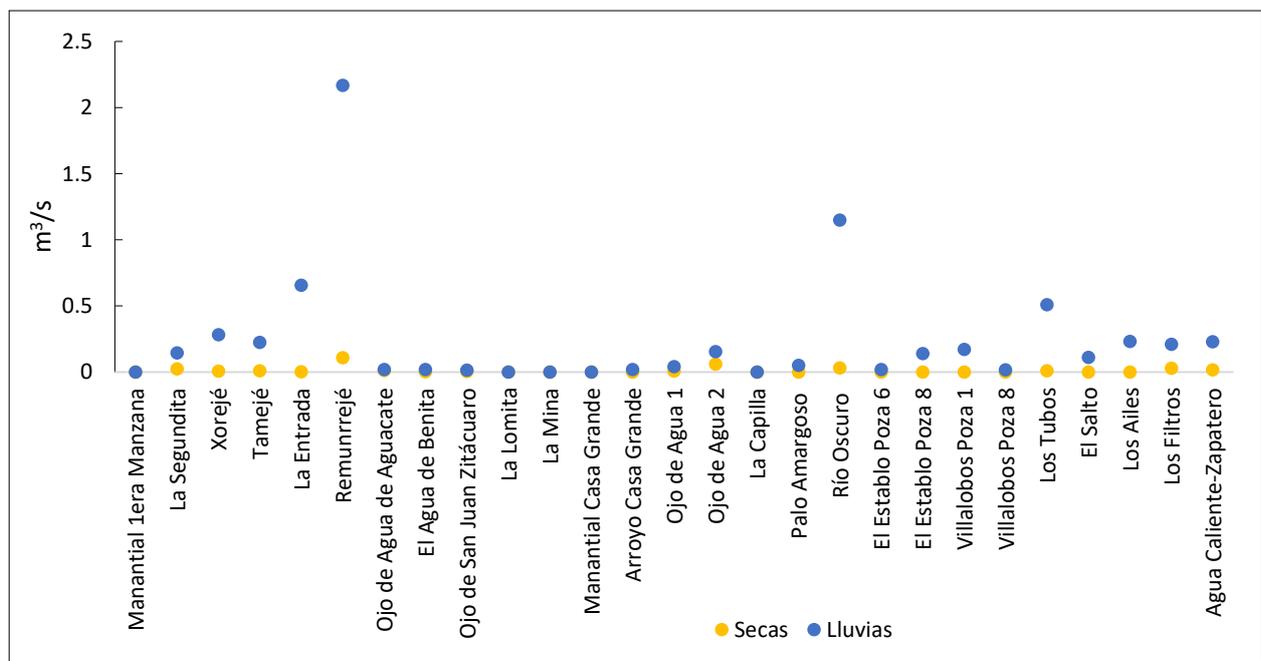


Figura 21. Variabilidad temporal del caudal

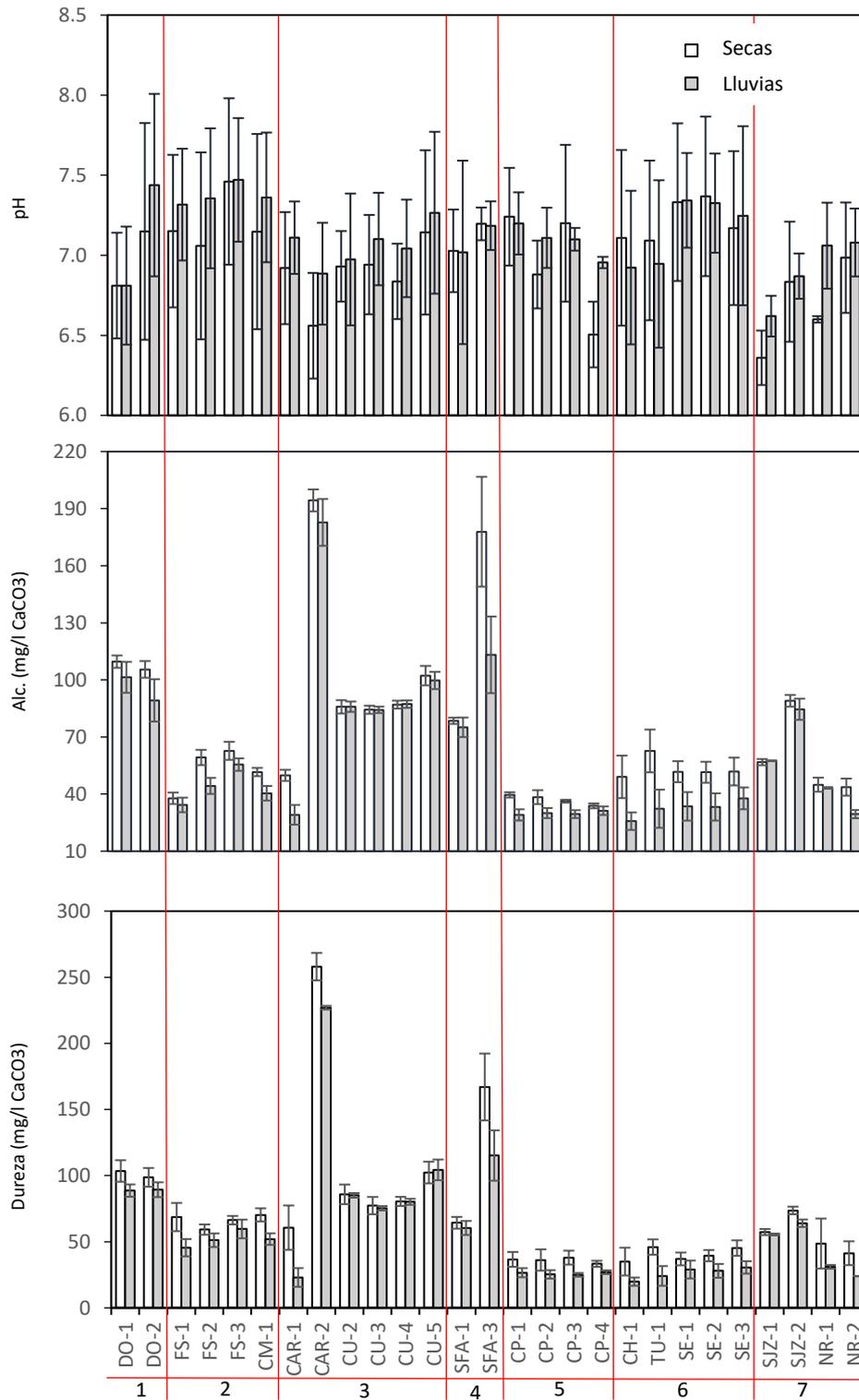
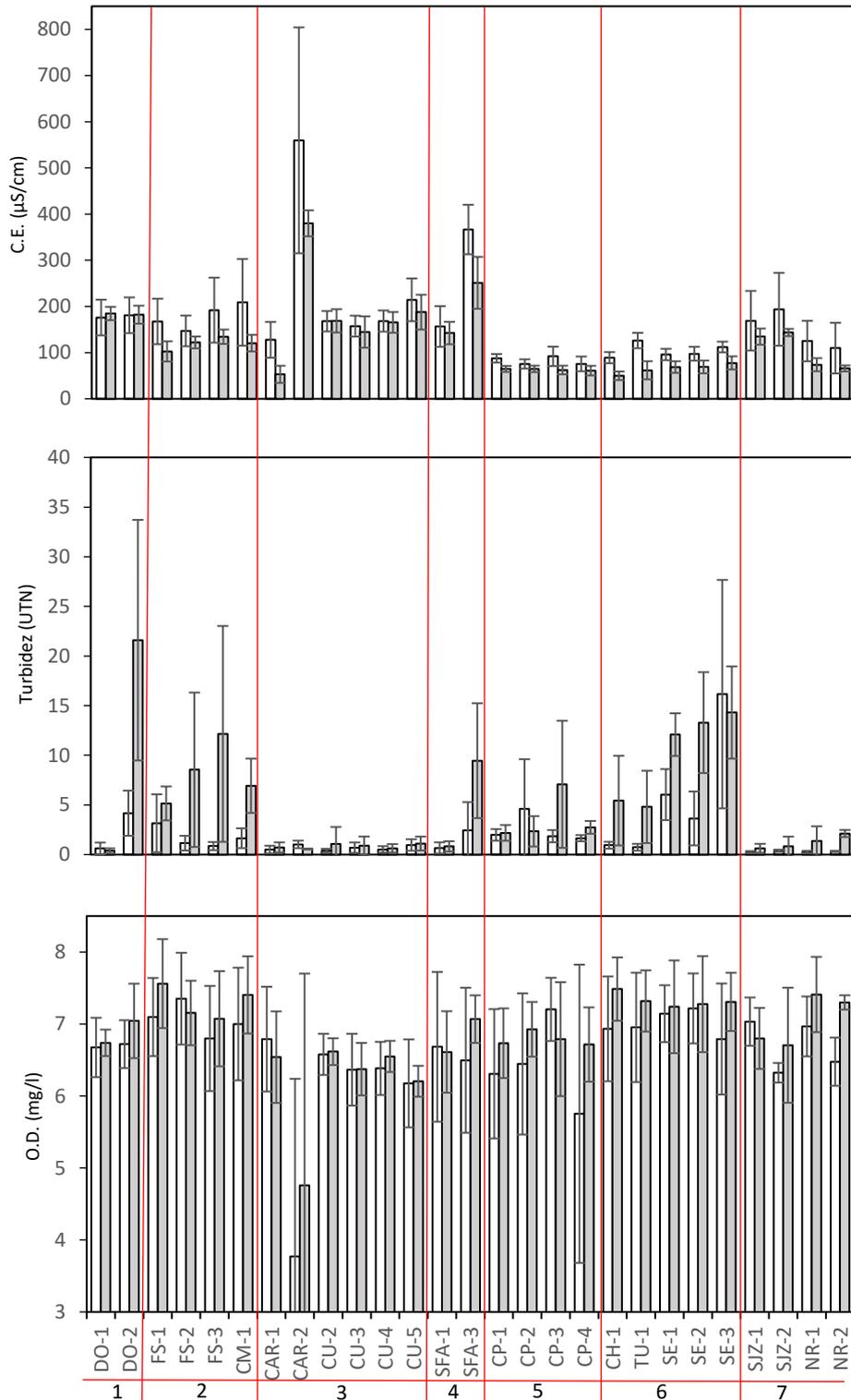
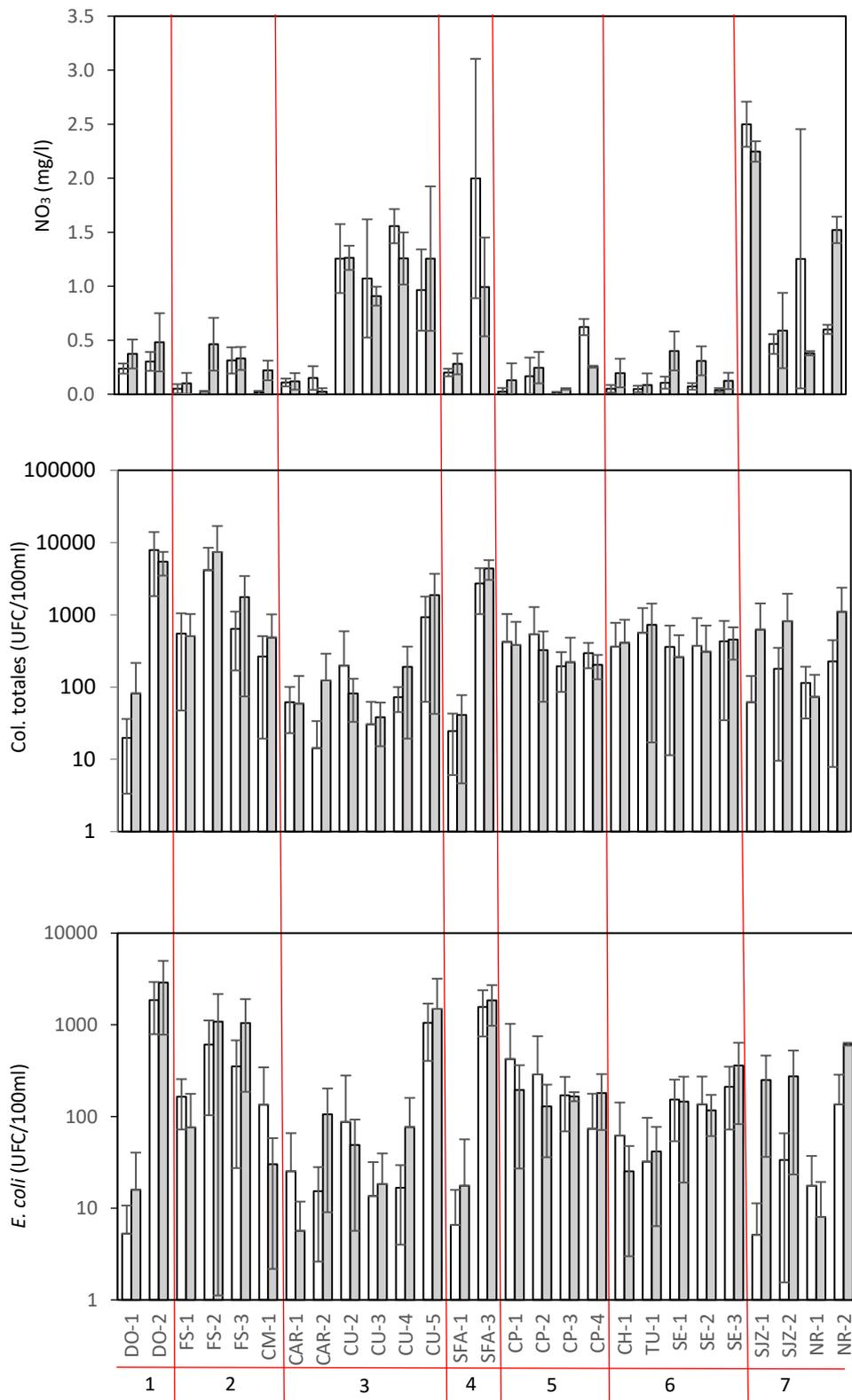


Figura 22. Valores (promedios  $\pm$  desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos durante el periodo de lluvias y secas en los distintos sitios de monitoreo de las microcuencas evaluadas en el periodo 2011-2017.

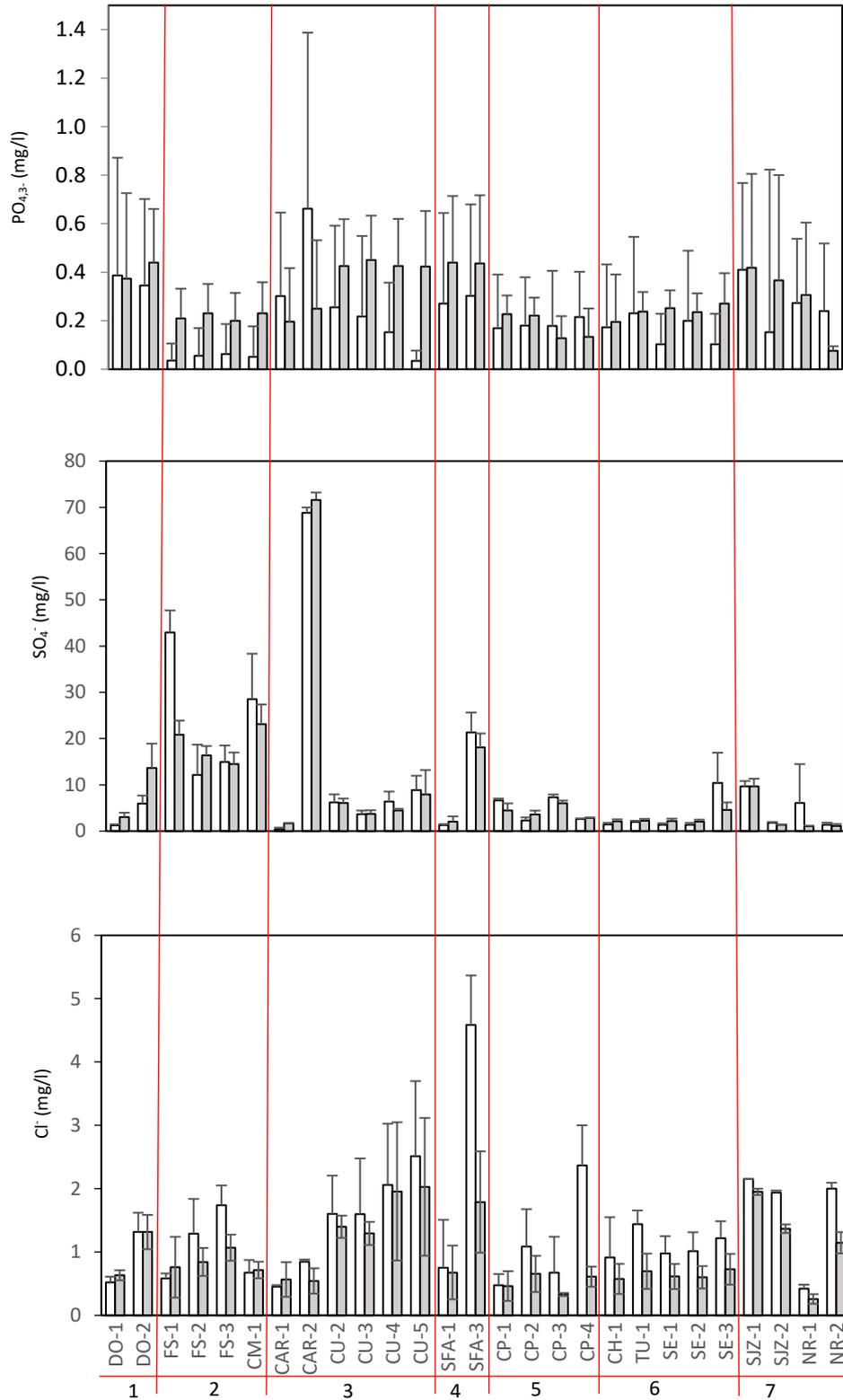
(Mc: 1= La Segundita, 2= Remunrejjé, 3= La Mina, 4= Palo Amargoso, 5= Del Llano, 6= Senguio, 7= Zitácuaro)



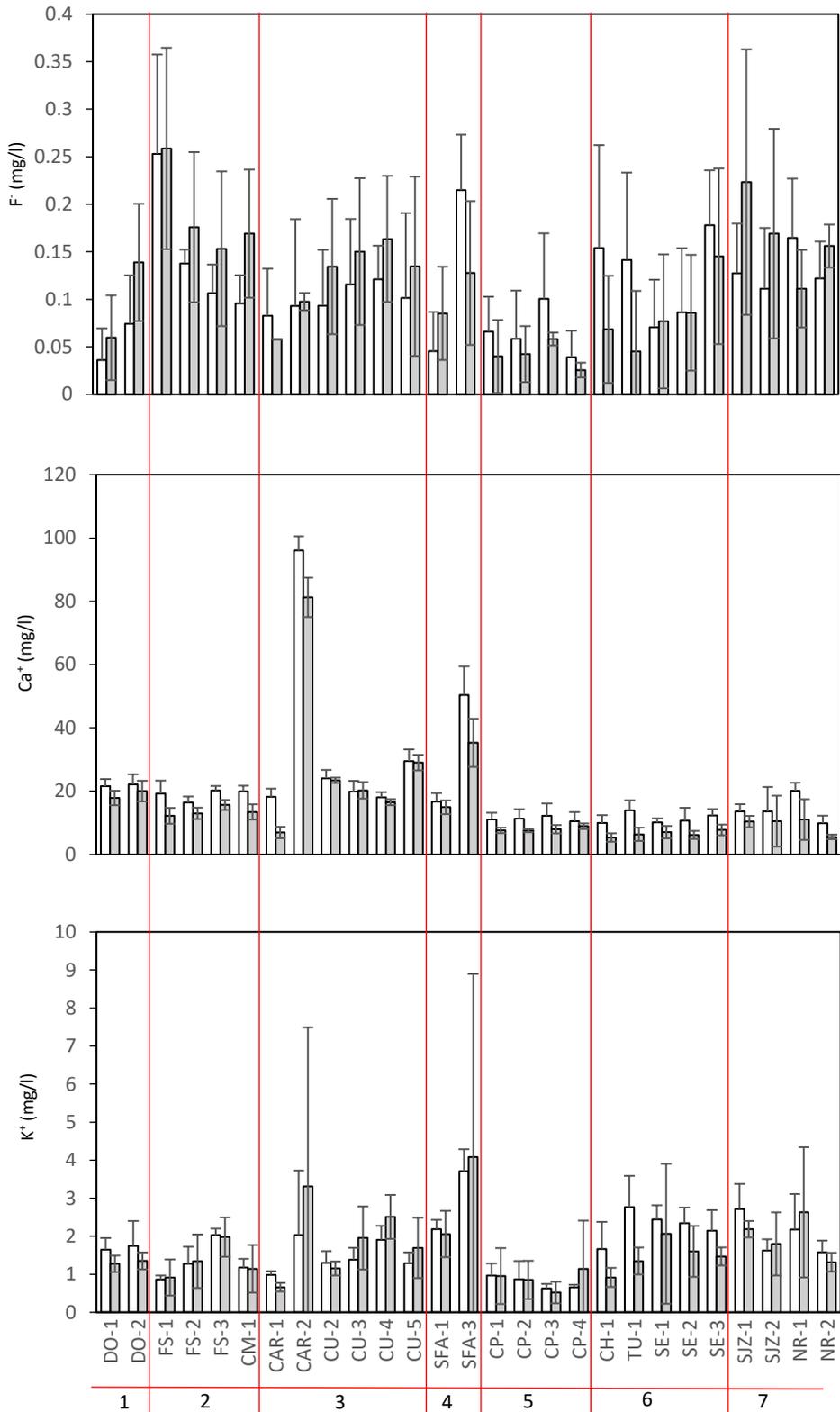
Continuación de la Figura 22. Valores (promedios  $\pm$  desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos durante el periodo de lluvias y secas en los distintos sitios de monitoreo de las microcuencas evaluadas en el periodo 2011-2017. (Mc: 1= La Segundita, 2= Remunrejé, 3= La Mina, 4= Palo Amargoso, 5= Del Llano, 6= Senguio, 7= Zitácuaro)



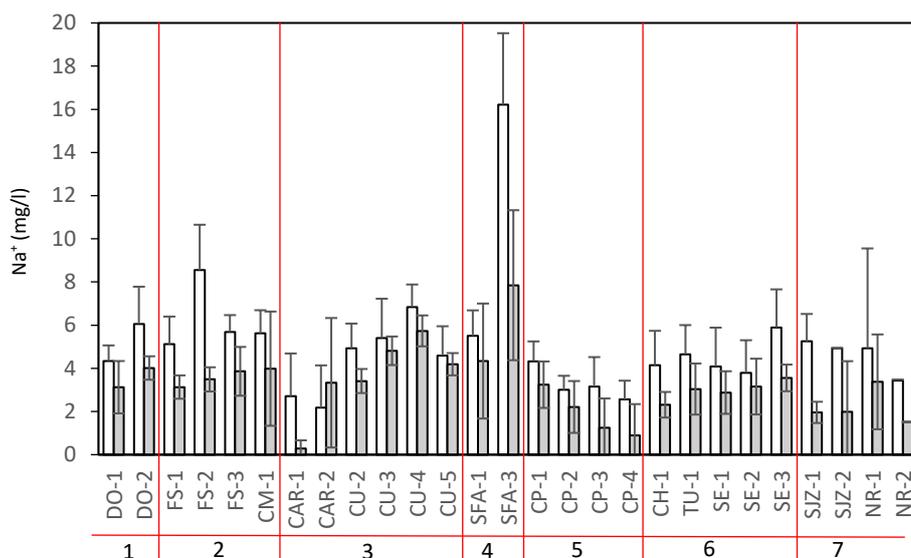
Continuación de la Figura 22. Valores (promedios  $\pm$  desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos durante el periodo de lluvias y secas en los distintos sitios de monitoreo de las microcuencas evaluadas en el periodo 2011-2017. (Mc: 1= La Segundita, 2= Remunreje, 3= La Mina, 4= Palo Amargoso, 5= Del Llano, 6= Senguio, 7= Zitácuaro)



Continuación de la Figura 22. Valores (promedios  $\pm$  desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos durante el periodo de lluvias y secas en los distintos sitios de monitoreo de las microcuencas evaluadas en el periodo 2011-2017. (Mc: 1= La Segundita, 2= Remunreje, 3= La Mina, 4= Palo Amargoso, 5= Del Llano, 6= Senguio, 7= Zitácuaro)



Continuación de la Figura 22. Valores (promedios  $\pm$  desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos durante el periodo de lluvias y secas en los distintos sitios de monitoreo de las microcuencas evaluadas en el periodo 2011-2017. (Mc: 1= La Segundita, 2= Remunrejé, 3= La Mina, 4= Palo Amargoso, 5= Del Llano, 6= Senguio, 7= Zitácuaro)



Continuación de la Figura 22. Valores (promedios  $\pm$  desviación estándar) de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos durante el periodo de lluvias y secas en los distintos sitios de monitoreo de las microcuencas evaluadas en el periodo 2011-2017. (Mc: 1= La Segundita, 2= Remunrrejé, 3= La Mina, 4= Palo Amargoso, 5= Del Llano, 6= Senguio, 7= Zitácuaro)

Tabla 10. Valores de caudal para sitios de la RMCA

Sitio	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	
	Lluvias (2016)	Secas (2017)
Manantial 1era Manzana	0.000	0.000
La Segundita	0.146	0.026
Xorejé	0.284	0.008
Tamejé	0.226	0.010
La Entrada	0.657	0.003
Remunrrejé	2.170	0.110
Ojo de Agua de Aguacate	0.021	0.014
El Agua de Benita	0.019	0.004
Ojo de San Juan Zitácuaro	0.014	0.005
La Lomita	0.000	0.000
La Mina	0.000	0.000
Manantial Casa Grande	0.000	0.000
Arroyo Casa Grande	0.021	0.000
Ojo de Agua 1	0.043	0.007
Ojo de Agua 2	0.156	0.060
La Capilla	0.000	0.000
Palo Amargoso	0.052	0.000
Río Oscuro	1.150	0.032
El Establo Poza 6	0.020	0.000
El Establo Poza 8	0.140	0.000
Villalobos Poza 1	0.172	0.000
Villalobos Poza 8	0.018	0.000
Los Tubos	0.510	0.011
El Salto	0.113	0.000
Los Ailes	0.232	0.000
Los Filtros	0.210	0.030
Agua Caliente-Zapatero	0.230	0.017

Tabla 11. Promedio y desviación estándar de los parámetros de calidad del agua para diferentes microcuencas del oriente en el periodo 2011-2017 y 2015-2017\*

Cuenca Parámetro	Senguio		Del Llano*		Palo Amargoso		La Mina*		La segundita		Remunreje		Zitácuaro*		Estándares para consumo humano
	Promedio (± desviación estándar)														
	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	
Alcalinidad	32.5 (±7)	53.4 (±8.2)	30 (±2.47)	37 (±1.78)	94.1 (±12.6)	128.2 (±15.3)	94.9 (±4.7)	100.6 (±3.6)	95.3 (±9.6)	108 (±3.8)	43.6 (±3.8)	52.8 (±3.5)	53.7 (±2.0)	58.6 (±3.2)	<sup>1</sup> 400 mg/l
pH	7.16 (±.4)	7.21 (±.5)	7.09 (±.12)	6.94 (±.3)	7.10 (±.36)	7.11 (±.18)	7.09 (±.12)	6.73 (±.27)	7.12 (±.14)	6.98 (±.25)	7.4 (±.5)	7.2 (±.5)	6.7 (±.23)	6.9 (±.19)	<sup>2</sup> 6.5-8.5
Conductividad eléctrica	65 (±14)	104 (±13.5)	63 (±8.4)	83 (±14)	197 (±40)	261 (±49)	183 (±28)	232 (±66)	183 (±17)	178 (±39)	120 (±17)	179 (±62)	104 (±11.5)	149.5 (±60.5)	<sup>3</sup> 250 µS/cm
Dureza	26.3 (±5.5)	40.5 (±6.3)	26 (±0.96)	36 (±1.96)	87.8 (±12.2)	115.7 (±14.9)	108 (±43)	108.3 (±47)	89 (±5.1)	101 (±7.6)	52.1 (±5.8)	66.1 (±5.7)	44 (±1)	55 (±8)	<sup>3</sup> 500 mg/l
Oxígeno Disuelto	7 (±0.5)	7 (±0.6)	6.8 (±0.5)	6.4 (±1.1)	6.8 (0.4)	6.6 (±1)	6.2 (±0.8)	6 (±0.8)	6.9 (±0.4)	6.7 (±0.4)	7.3 (±0.6)	7.1 (±0.7)	7.1 (±0.5)	6.7 (±0.3)	<sup>1</sup> 4 mg/l
Turbidez	10 (±4)	5.5 (±3.5)	3.6 (±2.3)	2.5 (±1.6)	5.1 (±3.15)	1.5 (±1.7)	1.33 (±1.9)	0.69 (±0.4)	11 (±6)	2.40 (±1.4)	12.2 (±13.4)	1.77 (±1.3)	1.24 (±0.82)	0.3 (±0.1)	<sup>2</sup> 5 UNT
Coliformes totales	431 (±406)	417 (±471)	283 (±284)	326 (±392)	2206 (±685)	1370 (±857)	394 (±386)	217 (±228)	2769 (±1052)	3957 (±3048)	2530 (±3070)	1398 (±1383)	653 (±825)	145 (±137)	<sup>2</sup> Ausencia
Coliformes fecales	138 (±103)	119 (±104)	167 (±97)	238 (±318)	929 (±452)	786 (±415)	291 (±323)	202 (±154)	1461 (±1065)	934 (±539)	559 (±518)	315 (±283)	286 (±155)	48 (±52)	<sup>2</sup> Ausencia
N-NO <sub>3</sub>	0.22 (±0.13)	0.06 (±0.03)	0.17 (±0.08)	0.21 (±0.07)	0.64 (±0.28)	1.10 (±0.57)	0.80 (±0.20)	0.85 (±0.26)	0.43 (±0.20)	0.27 (±0.07)	0.28 (±0.13)	0.10 (±0.05)	1.18 (±0.15)	1.20 (±0.44)	<sup>2</sup> 10 mg/l
Fosfatos	0.24 (±0.11)	0.16 (±0.22)	0.18 (±0.0.9)	0.19 (±0.21)	0.44 (±0.28)	0.29 (±0.38)	0.36 (±0.22)	0.27 (±0.33)	0.41 (±0.49)	0.37 (±0.42)	0.22 (±0.12)	0.05 (±0.11)	0.29 (±0.28)	0.27 (±0.39)	<sup>1</sup> 0.1 mg/l
Sulfatos	2.64 (±0.67)	3.32 (±1.6)	4.21 (±0.78)	4.7 (±0.45)	10 (±2)	11.31 (±2.26)	15.91 (±1.51)	15.72 (±1.55)	8.35 (±3.11)	3.59 (±1)	18.7 (±3)	24.6 (±6.2)	3.3 (±0.58)	4.71 (±2.56)	<sup>2</sup> 400 mg/l
Cloruros	0.64 (±0.23)	1.11 (±0.34)	0.51 (±0.18)	1.15 (±0.49)	1.23 (±0.61)	2.67 (±0.77)	1.30 (±0.5)	1.61 (±0.52)	0.97 (±0.18)	0.92 (±.20)	0.85 (±0.26)	1.07 (±0.28)	1.18 (±0.09)	1.63 (±0.05)	<sup>2</sup> 250 mg/l
Fluoruro	0.08 (±0.07)	0.13 (±0.08)	0.04 (±0.02)	0.07 (±0.05)	0.11 (±0.06)	0.13 (±0.05)	0.10 (±0.07)	0.12 (±0.05)	0.10 (±0.05)	0.06 (±0.04)	0.19 (±0.08)	0.15 (±0.04)	0.16 (±0.08)	0.13 (±0.05)	<sup>2</sup> 1.5 mg/l
Calcio	6.5 (±1.7)	11.4 (±2.6)	8 (±0.9)	11.3 (±3)	25.1 (±4.9)	33.5 (±5.9)	29.6 (±2.5)	34.3 (±3.1)	18.9 (±2.8)	21.9 (±2.7)	13.6 (±2.1)	19 (±2.3)	9.4 (±4.3)	14.3 (±3.7)	<sup>4</sup>
Potasio	1.5 (±0.7)	2.3 (±0.6)	0.9 (±0.7)	0.8 (±0.2)	3.1 (±2.7)	2.9 (±0.4)	1.9 (±1.1)	1.5 (±0.5)	1.3 (±0.2)	1.7 (±0.5)	1.3 (±0.6)	1.3 (±0.2)	2 (±0.8)	2 (±0.5)	-
Sodio	3 (±0.9)	4.5 (±1.6)	1.9 (±1.3)	3.3 (±1)	6.1 (±3.1)	10.9 (±2.2)	3.6 (±1.0)	4.4 (±1.6)	3.6 (±0.9)	5.2 (±1.2)	3.6 (±1.2)	6.2 (±1.3)	2.2 (±1.3)	4.6 (±1.5)	<sup>2</sup> 200 mg/l
Magnesio	2.2 (±0.7)	3.2 (±1.3)	1.5 (±0.3)	2 (±0.8)	6.4 (±2.2)	8.7 (±2.2)	6.4 (±1.3)	6.3 (±1)	9.9 (±1.4)	11.5 (±1.7)	4.6 (±0.9)	4.8 (±0.6)	4.9 (±1.2)	4.9 (±1.2)	-

<sup>1</sup>Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de la calidad del agua CE-CCA-001/89. Diario Oficial de la Federación, diciembre de 1989. Nota: El valor del estándar se debe de considerar como mínimo. <sup>2</sup>Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

<sup>3</sup>Guidelines for Drinking-water Quality 4<sup>a</sup> Ed. Organización Mundial de la Salud 2011.

<sup>4</sup>no presente en la legislación ambiental.

Tabla 12. Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para analizar los parámetros que presentan variabilidad temporal en las siete microcuencas de estudio.

Parámetro de calidad del agua	Microcuenca						
	Senguio	Palo Amargoso	La Mina	La Segundita	Remunreje	Zitácuaro	Del Llano
pH	.602	.439	.109	.683	.149	.149	1
Alcalinidad	<b>.009</b>	.439	.873	.121	.248	.564	<b>.021</b>
Dureza	<b>.009</b>	.439	.749	.121	<b>.043</b>	.386	<b>.021</b>
Oxígeno Disuelto	<b>.009</b>	.439	.873	.121	.149	.248	.248
Conductividad e.	<b>.009</b>	.439	.749	.121	<b>.021</b>	.248	<b>.021</b>
Turbidez	.251	.439	.200	1	<b>.021</b>	<b>.021</b>	.149
E. coli	.754	.439	.522	.439	1	.149	.564
Col. Totales	.917	.439	.522	1	.773	.149	.564
Nitratos	<b>.016</b>	1	.873	.121	.083	.773	.564
Sulfatos	.117	1	.873	.439	.773	.248	1
Fosfatos	<b>.028</b>	.121	.262	.439	<b>.021</b>	.564	1
Cloruros	<b>.009</b>	.439	.521	.683	1	.248	.080
Fluoruro	.206	1	.126	.439	.149	.243	.102
Calcio	<b>.009</b>	.439	.631	.121	<b>.021</b>	.146	<b>.021</b>
Sodio	<b>.009</b>	.439	.522	.121	<b>.021</b>	<b>.020</b>	.149
Potasio	<b>.016</b>	1	.521	.121	1	.885	.773
Magnesio	<b>.028</b>	1	.873	.121	.564	.773	.149

Nota: números en negritas indican los valores significativos ( $p < 0.05$ ) entre la temporada de lluvias y secas.

#### Variaciones espaciales

La prueba Kruskal – Walis proporcionó resultados de una diferencia ( $p < 0.05$ ) entre los rangos medios de al menos un par sitios. El pH no mostró diferencias a excepción de la temporada de secas en la microcuenca Del Llano\*. El OD y los fosfatos son los únicos parámetros que se comportan homogéneamente en todos los sitios de cada microcuenca (Tabla 12). El resto de los parámetros si presentan diferencias en más de una microcuenca (Tabla 13).

Las pruebas pares de Dunn se llevaron a cabo para distintos pares de grupos de cinco de las siete microcuencas. Las diferencias significativas ( $p < 0.05$  ajustado mediante corrección de Bonferroni) han resultado positivas solo para algunos parámetros con uno o más pares de sitios en cada microcuenca. Las variaciones con un mayor número de parámetros se presentan para las microcuencas Remunreje y La Mina, mientras que la microcuenca Zitácuaro y Del Llano muestran el menor número de parámetros con variación entre pares de sitios. Estas variaciones entre sitios de cada microcuenca se presentan mayormente en temporada de secas (Tabla 14).

Tabla 13. Resultados de la prueba K-W entre sitios expresando la variabilidad espacial de cada parámetro en ambas temporadas para cada microcuenca.

Microcuenca \ Parámetro	Senguio		Del Llano		Palo Amargoso		La Mina		La segundita		Remunreje		Zitácuaro	
	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
Alcalinidad	.190	<b>.012</b>	<b>.048</b>	.486	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.000</b>	<b>.000</b>	<b>.016</b>	.055	<b>.000</b>	<b>.000</b>	<b>.022</b>	.083
pH	.795	.317	<b>.039</b>	.164	.141	1	.274	.719	.262	.078	.411	.849	.065	.212
Conductividad eléctrica	<b>.007</b>	.020	.094	.972	<b>.004</b>	<b>.006</b>	<b>.005</b>	<b>.018</b>	.378	.873	.293	.054	.424	.129
Dureza	<b>.026</b>	<b>.019</b>	.739	.588	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.000</b>	<b>.000</b>	.198	.687	<b>.009</b>	<b>.018</b>	<b>.046</b>	.080
Oxígeno Disuelto	.866	.965	.368	.841	.810	.109	.128	.248	.810	.470	.700	.567	.084	.539
Turbidez	<b>.000</b>	<b>.004</b>	.803	.429	.055	<b>.004</b>	.131	.839	<b>.004</b>	<b>.004</b>	.141	.169	.306	.367
Coliformes totales	.800	.455	.762	.925	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.004</b>	.102	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.014</b>	<b>.011</b>	.522	.539
Coliformes fecales	<b>.013</b>	<b>.000</b>	.612	.815	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.013</b>	<b>.017</b>	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.020</b>	<b>.001</b>	.333	.160
N-NO <sub>3</sub>	.085	<b>.003</b>	<b>.005</b>	.119	.054	<b>.006</b>	<b>.001</b>	<b>.009</b>	.037	.519	<b>.001</b>	<b>.009</b>	.157	.112
Fosfatos	.979	.836	.967	.186	.618	.873	.636	.628	.629	.423	.952	.995	.863	.367
Sulfatos	<b>.002</b>	<b>.016</b>	<b>.004</b>	.071	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.001</b>	<b>.001</b>	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.001</b>	<b>.000</b>	.183	.177
Cloruros	.141	.480	.116	.131	<b>.016</b>	<b>.016</b>	<b>.003</b>	<b>.014</b>	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.024</b>	<b>.001</b>	<b>.028</b>	.112
Fluoruro	.120	.437	.494	.412	<b>.004</b>	.749	.564	.482	.147	<b>.025</b>	<b>.003</b>	.193	.742	.668
Calcio	.164	.102	.928	.281	<b>.004</b>	<b>.004</b>	<b>.000</b>	<b>.010</b>	.522	.150	<b>.027</b>	.112	.192	.572
Potasio	.120	.062	.343	.610	<b>.004</b>	.631	.056	<b>.017</b>	.631	.749	<b>.001</b>	<b>.014</b>	.129	.572
Sodio	.133	.161	.409	.078	<b>.004</b>	.025	<b>.003</b>	<b>.002</b>	<b>.037</b>	.150	.516	.331	.243	.321
Magnesio	.436	<b>.018</b>	.714	.071	<b>.004</b>	.749	<b>.003</b>	<b>.002</b>	.150	.200	<b>.004</b>	.922	.282	.160

Nota: los números en negritas indican los resultados estadísticamente significativos ( $p < 0.05$ ) entre los sitios en las dos temporadas.

Los parámetros con resultados en sombreado blanco son los que no presentaron diferencias en ningún sitio. \*La diferencia marcada en pH para la temporada de secas en la microcuenca Del Llano la prueba *post hoc* la descartó.

Tabla 14. Resultado de sitios apareados con diferencia significativa en la distribución de distintos parámetros de calidad del agua.

MC	Parámetro	Sitios apareados con diferencias significativas	
		Secas	Lluvias
Senguio	Alcalinidad y Dureza		Los Tubos – Los Ailes
	Conductividad e.	Los Tubos – El Salto	Los Tubos – El Salto
	Turbidez	El Salto – Agua Caliente Z El Salto – Los Ailes Los Tubos – Los Ailes	
	E. coli	El Salto – Los Ailes	Los Tubos – Los Ailes El Salto – Los Ailes
	N - Nitratos		El Salto – Agua Caliente Z
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	Agua Caliente – Los Ailes Los Filtros – Los Ailes Los Tubos – Los Ailes	Los Filtros – Los Ailes Los Tubos – Los Ailes
Del Llano	Alcalinidad	Villalobos P.8 – Establo P.8	
	N – Nitratos	Establo P.8 – Villalobos P.8 Establo P.6 – Villalobos P.8	
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	Villalobos P.1 – Establo P.6 Villalobos P.1 – Establo P.8	
La Mina	Alcalinidad y Dureza	La Lomita – Arroyo Casa Gde. La Lomita – La Mina Ojo de Agua 1 – Arroyo Casa Gde. Ojo de Agua 1 – La Mina	La Lomita – Arroyo Casa Gde. La Lomita – La Mina Ojo de Agua 1 – Arroyo Casa Gde. Ojo de Agua 1 – La Mina
	Conductividad e.	La Lomita – La Mina Ojo de Agua 1 – La Mina	La Lomita – La Mina
	E. coli	Ojo de Agua 1 – Arroyo Casa Gde.	Ojo de Agua 1 – Arroyo Casa Gde.
	Col. Totales	La Mina – Arroyo Casa Gde. Ojo de Agua 1 – Arroyo Casa Gde.	
	N – Nitratos	La Lomita – Ojo de Agua 2 La Mina – Ojo de Agua 2	
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	La Lomita – Arroyo Casa Gde. La Lomita – La Mina Ojo de Agua 1 – La Mina	La Lomita – La Mina Ojo de Agua 1 – La Mina
	Cloruros	La Lomita – Arroyo Casa Gde. La Lomita – Ojo de Agua 2	

	Calcio	La Lomita – La Mina Ojo de Agua 2 – Arroyo Casa Gde. Ojo de Agua 2 – La Mina Ojo de Agua 1 – La Mina	Ojo de Agua 2 – Arroyo Casa Gde.
	Sodio	La Mina – Ojo de Agua 2 La Capilla – Ojo de Agua 2	La Lomita – Ojo de Agua 2 La Capilla – Ojo de Agua 2
	Potasio		La Lomita – Ojo de Agua 2 La Capilla – Ojo de Agua 2
	Magnesio	La Lomita – Ojo de Agua 2 La Mina – Ojo de Agua 2	La Lomita – Ojo de Agua 2 Ojo de Agua 1 – Ojo de Agua 2 La Capilla – Ojo de Agua 2
Remunreje	Alcalinidad	Xoreje – Tameje Xoreje – Remunreje	Xoreje – Remunreje La Entrada – Remunreje
	Dureza	Tameje – La Entrada	Xoreje – Remunreje
	E. coli	La Entrada – Tameje	La Entrada – Tameje La Entrada - Remunreje
	Col. Totales	La Entrada – Tameje	La Entrada – Tameje Xoreje – Tameje
	N – Nitratos	La Entrada – Remunreje Tameje – Remunreje	Xoreje – Remunreje Xoreje – Tameje
	Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	Tameje – Xoreje Remunreje – Xoreje	Remunreje – Xoreje Remunreje – La Entrada Tameje – La Entrada
	Fluoruro	La Entrada – Xoreje Remunreje – Xoreje	
	Calcio	Tameje – Remunreje	
	Cloruros		Xoreje – Tameje Xoreje – Remunreje La Entrada – Remunreje
	Potasio	Xoreje – Remunreje	Xoreje - Remunreje
	Magnesio	Remunreje – Xoreje Remunreje – La Entrada	
Zitacuaro	Alcalinidad y Dureza	Agua de Benita – Ojo de SJZ	
	Cloruros	La Presa – Ojo de Agua del Aguacate	

Nota: Algunos parámetros que aparecen en la tabla 11 con diferencias significativas, en esta tabla ya no aparecen debido al ajuste de Bonferroni después de la prueba *post hoc*, estos ya no estuvieron dentro del ( $p < 0.05$ ).

El primer sitio de cada par es el que tiene la menor media de rango del respectivo parámetro, mientras que el otro sitio es el que tiene la mayor media de rango.

En los Anexos (3-11) se despliegan los rangos de comparaciones por parejas de sitios para cada parámetro significativo ( $p < 0.05$ ).

La prueba *post hoc* Dunn de múltiples comparaciones pareadas después de la K-W, indicó específicamente cuales fueron los sitios que mostraron entre sí las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) que se expusieron en párrafos anteriores.

Para el caso de la microcuenca La Segundita y la microcuenca Palo Amargoso las variaciones espaciales que se presentaron no se sometieron a la prueba *post hoc* debido a que estas microcuencas solo se componen por dos sitios de muestreo cada una. Por lo tanto, las diferencias espaciales significativas para los parámetros señalados corresponden al único par de sitios de la microcuenca. No obstante, las pruebas se corrieron para cada temporada, donde ningún parámetro mostró diferencias.

En la microcuenca de Senguio el par conformado por el sitio Los Tubos y el sitio Los Ailes es el que presentan diferencias en un mayor número de parámetros, ambos marcan diferencia en cinco de seis parámetros resultantes con diferencia significativa ( $p < 0.05$ ).

Para la microcuenca Del Llano, el sitio de Villalobos Poza 8 es el que marca diferencias con cada uno de los sitios restantes. Es importante destacar que tanto las dos pozas de Villalobos como las dos pozas de El Establo no formaron pares en alguna ocasión, es decir, espacialmente los parámetros no tienen diferencias significativas.

En lo que respecta la microcuenca La Mina, el sitio de La Lomita y Ojo de Agua 1 con el sitio de La Mina y Arroyo Casa Grande respectivamente, son principalmente los pares más repetitivos en la mayoría de los parámetros. Aunado a lo anterior, es una de las dos microcuencas que más parámetros con diferencias significativas presenta, esto por la cantidad de sitios y su dispersa distribución. A pesar de ello, en ambas temporadas no difiere mucho el comportamiento de la mayoría de los sitios.

La microcuenca Remunrrejé resultó con 11 parámetros significativos, en los que en la mitad de ellos las diferencias principalmente se encuentran entre el par de sitios compuestos por Xorejé y Remunrrejé. Xorejé es el único sitio de la microcuenca que está dentro del área forestal, mientras que Remunrrejé se posiciona en el punto más cercano a la mancha urbana del municipio de Zitácuaro, es también el sitio más lejano con respecto a la ubicación de Xorejé. Otros de los pares que difieren en varios parámetros es La Entrada y Remunrrejé, con factores similares a los del par anterior, a excepción de que La Entrada está en un área donde la agricultura está reemplazando el área forestal. No obstante, para algunos otros parámetros como fluoruros, sulfatos y magnesio los pares de sitios

ya mencionados cambian su posición y dejan al sitio de Remunrrejé con el de menor rango de media en esos parámetros.

Para la microcuenca Zitácuaro de acuerdo con la prueba K – W los sitios no presentan diferencias significativas en la mayoría de los parámetros. Los únicos que mostraron diferencias son alcalinidad y dureza en el par de Agua de Benita con Ojo de Agua de San Juan Zitácuaro y en cloruros el par de La Presa y Ojo de Agua del Aguacate. Los sitios de Agua de Benita y La Presa son los que se encuentran más cerca de la cubierta forestal y más alejados de la mancha urbana, sin embargo, la expansión de las plantaciones arbóreas es colindante a ellos y está a poco de cubrirlos, lo que ya ha sucedido con los ojos de agua San Juan Zitácuaro y del Aguacate.

Finalmente, en las microcuencas Palo Amargoso y La Segundita que solo cuentan con dos sitios cada una, resultaron diversos parámetros con significancia estadística, como se muestra en la tabla 12. Aunque la prueba *post hoc* no se pueda desarrollar por obvias razones, es importante señalar el orden de los sitios en respuesta a cada parámetro. Para el caso de la microcuenca Palo Amargoso, tanto en los parámetros de secas como en los de lluvias el sitio de Palo Amargoso fue el que menor rango de medias tuvo en comparación con los elevados valores de su par Río Oscuro. En la microcuenca La Segundita solo en alcalinidad, el sitio Manantial 1era Manzana se posicionó con los mayores rangos de medias. En el resto de los parámetros fue el sitio La Segundita el que domino los valores más altos y el Manantial los menores.

Calidad del agua para consumo humano, riego agrícola y vida acuática

Índice de calidad del agua

Los resultados del índice de calidad del agua (Tabla 15) muestran en general para todas las microcuencas, poca variabilidad estacional. Con base en los valores del ICA, para todos los sitios de las microcuencas Del Llano, Senguio, Palo Amargoso, La Mina y Zitácuaro la calidad del agua para vida acuática es Excelente (E), así como en la microcuenca Remunrrejé solo para el sitio La Entrada (CM-1), ya que para los tres restantes es Aceptable (A), al igual que en el sitio La Segundita (DO-2) solo en temporada de lluvias, el cual presenta el valor más bajo del ICA (69) reportado en este estudio.

Para el uso agrícola La Segundita se encuentra en la categoría de Levemente contaminado, no obstante, en este uso es descrita como “utilizable en la mayoría de los cultivos”. El resto de las

microcuencas y sitios se encuentran dentro de la categoría Aceptable, que responde a solo “purificación menor para cultivos que requieran alta calidad de agua”.

Correspondiente al uso como agua potable, las microcuencas Del Llano y Senguio mantienen casi todos sus sitios en categoría de Aceptable, la excepción está en el sitio de Villalobos Poza 8 (CP-4) que, con un valor de 79 en temporada de secas, presenta Leve contaminación (LC), al igual que el sitio de Los Ailes (SE-3) en la microcuenca de Senguio, en temporada de lluvias.

En este uso de agua potable, la categoría Aceptable y Levemente contaminada se marca como medida la purificación menor necesaria y dudoso consumo sin purificación, respectivamente, y un tratamiento de purificación indispensable en la categoría de Contaminada (C). En la microcuenca Palo Amargoso, uno de sus dos sitios -Río oscuro (SFA-3)- presenta en ambas temporadas Leve contaminación. Sucede lo mismo para dos sitios de la microcuenca Remunrrejé (Xorejé (FS-1) y Tamejé (FS-2)) y dos de La Mina; el Arroyo Casa Grande (CU-5) y La Mina (CAR-2) y solo para lluvias los sitios de La Capilla (CU-2) y Ojo de Agua 2 (CU-4). El sitio DO-2 presenta Contaminación en lluvias y Leve contaminación en secas. Por último, la microcuenca de Zitácuaro, solo dos de sus cuatro sitios no son Aceptables; el Ojo del Aguacate (SJZ-1) con Leve Contaminación en secas y el Agua de Benita (NR-2) en lluvias.

Tabla 15. Calidad del agua en los sitios monitoreados durante el periodo 2011-2017 de la RMCCA-RBMM con base en el ICA propuesto por Dinius (1987)

Microcuenca	Sitio	Valor ICA ( $\pm$ DE) <sup>1</sup>		Agua Potable		Vida acuática (peces)		Riego agrícola	
		Secas	Lluvias	S <sup>2</sup>	LI <sup>3</sup>	S	LI	S	LI
Del Llano	CP-1	83 ( $\pm$ 6.0)	83( $\pm$ 4.4)	A	A	E	A	A	A
	CP-2	84( $\pm$ 4.4)	83( $\pm$ 1.8)						
	CP-3	83( $\pm$ 3.0)	84( $\pm$ 0.5)						
	CP-4	79( $\pm$ 0.7)	83( $\pm$ 0.9)	LC					
Senguio	CH-1	86( $\pm$ 3.7)	86( $\pm$ 3.6)	A	LC				
	TU-1	87( $\pm$ 3.0)	84( $\pm$ 2.3)						
	SE-1	83( $\pm$ 4.2)	81( $\pm$ 2.5)						
	SE-2	84( $\pm$ 3.2)	82( $\pm$ 2.2)						
	SE-3	80( $\pm$ 2.7)	79( $\pm$ 2.3)						
Palo Amargoso	SFA-1	89( $\pm$ 4.9)	87( $\pm$ 3.0)	A					
	SFA-3	71( $\pm$ 2.9)	71( $\pm$ 1.4)	LC					
La Mina	CAR-1	85( $\pm$ 3.1)	92( $\pm$ 3.7)	A	E				
	CAR-2	72( $\pm$ 5.9)	75( $\pm$ 6.4)	LC	LC				
	CU-2	81( $\pm$ 3.9)	79( $\pm$ 2.3)	A	A				
	CU-3	85( $\pm$ 4.3)	82( $\pm$ 3.4)		LC				
	CU-4	81( $\pm$ 2.1)	78( $\pm$ 3.6)	LC	LC				
	CU-5	74( $\pm$ 2.8)	71( $\pm$ 6.1)						
La Segundita	DO-1	87( $\pm$ 2.2)	86( $\pm$ 5.3)	A					
	DO-2	71( $\pm$ 2.7)	69( $\pm$ 1.7)	LC	C	E	A	A	LC
Remunrrejé	CM-1	80( $\pm$ 2.1)	84( $\pm$ 3.0)	A		E		A	A
	FS-1	79( $\pm$ 3.0)	79( $\pm$ 2.3)	LC		A			
	FS-2	79( $\pm$ 2.2)	76( $\pm$ 2.4)	A		E			
	FS-3	82( $\pm$ 1.9)	84( $\pm$ 1.9)	LC	A				
Zitácuaro	SJZ-1	79( $\pm$ 4.6)	80( $\pm$ 6.2)	LC	A	E	A	A	A
	SJZ-2	83( $\pm$ 3.7)	82( $\pm$ 7.1)	A					
	NR-1	83( $\pm$ 4.3)	87( $\pm$ 2.9)	A	LC				
	NR-2	82( $\pm$ 1.5)	78( $\pm$ 1.3)						

<sup>1</sup>Desviación estándar

<sup>2</sup>Secas

<sup>3</sup>Lluvias

Notas: Excelente (E), Aceptable (A), Levemente contaminada (LC), Contaminada (C), Fuertemente contaminada (FC), Excesivamente contaminada (EC).

## Relación entre usos del suelo y parámetros de calidad del agua

El análisis de correlación Spearman muestra relaciones significativas entre los diferentes usos y cubiertas de suelo y los parámetros de calidad del agua durante temporada de secas y lluvias (Tabla 16). Específicamente, el pH se correlaciona de forma positiva en temporada de lluvias con la categoría agrícola (0.473,  $p < 0.05$ ), y para la de plantaciones arbóreas su correlación es significativamente negativa en ambas temporadas de muestreo (-0.482 y -0.480,  $p < 0.05$ ). La alcalinidad (0.446 y 0.387,  $p < 0.05$ ), la dureza (0.410 y 0.414  $p < 0.05$ ) y la conductividad eléctrica (0.469 y 0.408,  $p < 0.05$ ), en cambio, muestran correlación positiva en lluvias y secas para plantaciones arbóreas y correlación negativa para la categoría de ganadería extensiva. El caso del oxígeno disuelto (OD) es el único parámetro que solo tiene correlación positiva con la categoría forestal en temporada de secas (0.415,  $p < 0.05$ ).

La turbidez se correlaciona positivamente en temporada de lluvias con la categoría agrícola (0.389,  $p < 0.05$ ), con plantaciones arbóreas su correlación es también significativa, pero de forma negativa (-0.484,  $p < 0.05$  y -0.557,  $p < 0.01$ ). Los coliformes fecales, solo muestran correlación negativa en temporada de lluvias con la categoría forestal (-0.661,  $p < 0.05$ ) y correlación positiva en secas para la categoría agrícola (0.403,  $p < 0.05$ ). Para esta última categoría también los coliformes totales muestran correlación positiva en ambas temporadas (0.450 y 0.406,  $p < 0.05$ ) y negativa en plantaciones arbóreas para la época de estiaje (-0.410,  $p < 0.01$ ).

Los nitratos solo presentan correlación positiva con plantaciones arbóreas, esto para las dos temporadas (0.558,  $p < 0.05$  y 0.678,  $p < 0.01$ ). Para secas también de forma positiva, los fosfatos se correlacionan con plantaciones arbóreas (0.434,  $p < 0.05$ ), y negativamente con ganadería extensiva en temporada de lluvias (-0.455,  $p < 0.05$ ). Los sulfatos tienen una correlación negativa con categoría forestal en temporada de lluvias (-0.405,  $p < 0.05$ ), y en esta misma temporada correlación positiva con categoría agrícola (0.414,  $p < 0.05$ ).

Los cloruros se ven correlacionados negativamente en secas con la categoría forestal (-0.431,  $p < 0.05$ ) y en lluvias con ganadería extensiva (-0.442,  $p < 0.05$ ), mientras que su correlación positiva solo la comparte con plantaciones arbóreas en lluvias (0.418,  $p < 0.05$ ). De igual manera sucede con el fluoruro en el caso de plantaciones arbóreas (0.414,  $p < 0.05$ ), mientras que, la correlación negativa la tiene en ambas temporadas con la ganadería extensiva (-0.590,  $p < 0.01$  y -0.423,  $p < 0.05$ ).

El catión sodio arrojó correlaciones positivas significativas con uso agrícola (0.389 y 0.440,  $p < 0.05$ ) y negativas con ganadería extensiva (-0.402 y -0.469,  $p < 0.05$ ), en ambos casos para las dos temporadas. El potasio resultó correlacionado de forma positiva solo con plantaciones arbóreas en temporada de lluvias (0.584,  $p < 0.01$ ), y se correlaciona negativamente en ambas temporadas con ganadería extensiva (-0.516 y -0.589,  $p < 0.01$ ). El calcio muestra dos correlaciones negativas, una para lluvias en la categoría forestal (-0.468,  $p < 0.05$ ) y otra para secas en la categoría de ganadería extensiva (-0.469,  $p < 0.05$ ), la única correlación positiva del calcio es para plantaciones arbóreas en época de lluvias (0.389,  $p < 0.05$ ). Finalmente, el magnesio se correlacionó positivamente con plantaciones arbóreas (0.460 y 0.438,  $p < 0.05$ ) y negativamente con ganadería extensiva (-0.549 y -0.616,  $p < 0.01$ ), ambas correlaciones son en las dos temporadas de muestreo.

Tabla 16. Coeficiente de correlación Spearman entre parámetros de calidad del agua y variables de cubiertas del suelo en temporadas de lluvias y secas.

Parámetros de calidad del agua	Forestal		Agrícola		Plantaciones Arbóreas		Ganadería Extensiva	
	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas
pH	.056	.154	<b>.473*</b>	.246	<b>-.482*</b>	<b>-.480*</b>	-.040	.13
Alc	-.324	-.227	.339	.344	<b>.446*</b>	<b>.389*</b>	<b>-.482*</b>	<b>-.589**</b>
Dureza	-.361	-.211	.344	.325	<b>.410*</b>	<b>.414*</b>	<b>-.402*</b>	<b>-.562**</b>
OD	.298	<b>.415*</b>	.095	.115	-.283	-.365	-.147	-.228
C.E.	-.374	-.239	.347	.375	<b>.469*</b>	<b>.408*</b>	<b>-.468*</b>	<b>-.602**</b>
Turbdz	-.002	-.025	<b>.389*</b>	.215	<b>-.484*</b>	<b>-.557**</b>	.040	.348
<i>E. coli</i>	<b>-.661*</b>	-.353	.378	<b>.403*</b>	.084	-.348	.120	.254
Col. Tot	-.377	-.150	<b>.450*</b>	<b>.406*</b>	-.058	<b>-.410*</b>	-.134	.080
Nitratos	-.283	-.222	.081	-.168	<b>.558*</b>	<b>.678**</b>	-.348	-.254
Fosfatos	-.020	-.101	.120	-.294	.366	<b>.434*</b>	<b>-.455*</b>	-.080
Sulfatos	<b>-.405*</b>	-.376	<b>.414*</b>	.271	.011	.154	-.027	.000
Cloruro	-.301	<b>-.431*</b>	.280	.020	<b>.418*</b>	.371	<b>-.442*</b>	.027
Fluoruro	-.113	.135	.271	-.025	<b>.414*</b>	.306	<b>-.590**</b>	<b>-.423*</b>
Sodio	-.110	-.137	<b>.389*</b>	<b>.440*</b>	.138	.150	<b>-.402*</b>	<b>-.469*</b>
Potasio	-.125	.331	-.004	.136	<b>.584**</b>	-.003	<b>-.516**</b>	<b>-.589**</b>
Calcio	<b>-.468*</b>	-.351	.339	.367	<b>.389*</b>	.324	-.268	<b>-.469*</b>
Magnesio	-.294	-.159	.355	.304	<b>.460*</b>	<b>.438*</b>	<b>-.549**</b>	<b>-.616**</b>

Nota: El uso urbano y la cubierta sin vegetación no presentaron relación con ningún parámetro, en ninguno de los dos niveles, por la ausencia de sitios en estas categorías.

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0.01 (2 colas)

\* . La correlación es significativa en el nivel 0.05 (2 colas)

## DISCUSIÓN

Relación entre diferentes usos del suelo y la calidad del agua

Los resultados del presente estudio indican que el uso forestal, el uso agrícola y las plantaciones arbóreas principalmente, tienden a presentar correlaciones estadísticamente significativas -positivas o negativas- con algunos de los principales parámetros de calidad del agua. Estos resultados coinciden con estudios que establecen a las áreas agrícolas y urbanas como los principales usos del suelo asociados a concentraciones elevadas de nutrientes y al bosque como un mecanismo natural de depuración (Ahearn et al., 2005, Li et al., 2008; Ding et al., 2015; Mello et al., 2018).

El uso agrícola se asocia a la presencia de nitratos y fosfatos en los cuerpos de agua aledaños (Meybeck *et al.*, 1996). En este estudio presentan una correlación significativa positiva con plantaciones arbóreas. También se detectaron otros indicadores de calidad del agua específicos para esta cubierta del suelo, como iones (fósforo, potasio, calcio y magnesio) que normalmente se le adicionan al suelo por medio de fertilizantes para los árboles frutales, como el del aguacate (Tapia Vargas *et al.*, 2005). Encontramos presencia de iones de potasio, calcio y magnesio asociados con las plantaciones arbóreas, en temporada de lluvias. Esto coincide con los estudios de Li et al. (2009) y Bu et al. (2014) quienes señalan que en temporada de lluvias el uso agrícola se relaciona con más variables que durante la temporada de secas, como resultado del arrastre de sedimentos y fertilizantes aplicados, que se presentan a través de la escorrentía (N. Peters y Meybeck, 2000).

El uso agrícola, que en nuestro caso agrupa los cultivos temporales (maíz, trigo, frijol, hortalizas), presenta relación con los sulfatos, coliformes fecales (*E. coli*), coliformes totales, turbidez y sodio, los cuales con excepción de la turbidez y el sodio presentan concentraciones sin diferencia significativa entre lluvias y secas. La presencia de sulfatos puede deberse a la oxidación de sulfuros en rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, así como de la concentración en el suelo del agua de lluvia, lo mismo que sucede con el sodio (Custodio, 2001). Las actividades urbanas y agrícolas y otras prácticas antropogénicas, que implican el uso de combustibles fósiles o químicos con azufre, son las que tienen mayor impacto en esta correlación (García *et al.*, 2006; Ayala Morales, 2014). Por lo tanto, a pesar de que las máximas concentraciones de sulfatos encontradas (71 mg/l) no superen el límite máximo permisible (400 mg/l), su presencia puede ser un indicador de contaminación antrópica derivada de fuentes difusas que requiere monitoreo.

En el caso de la relación entre el uso del suelo agrícola con los coliformes fecales, estos comúnmente provienen de fuentes puntuales como descargas de aguas negras, lixiviados de fosas sépticas y heces de humanos y animales por defecación al aire libre. Esta contaminación por coliformes también puede presentarse por fuentes difusas, tales como el estiércol utilizado como fertilizante orgánico, el riego de cultivos con aguas negras y la ganadería extensiva (Chapman y Kimstach, 1996; Reder, Flörke y Alcamo, 2015). La relación de coliformes fecales con el uso agrícola probablemente se deba a la cercanía de zonas habitadas sin sistema de saneamiento adecuado, así como a la presencia de distintos tipos de animales que defecan o transportan en sus patas materia fecal (Knee y Encalada, 2014; Reder, Flörke y Alcamo, 2015; Mello *et al.*, 2018).

El que no se hayan detectado variaciones temporales en los sulfatos ni en coliformes fecales, responde a una constante fuente de emisión durante al menos los 6 años de muestreo. Por otra parte, las variaciones espaciales muestran una dinámica diferente para cada microcuenca, por lo cual las concentraciones en cada sitio dependerán de la fuente de emisión del parámetro.

El uso del suelo forestal, por su parte, presenta una relación inversa tanto con sulfatos como con coliformes fecales y se relaciona de manera positiva con el oxígeno disuelto, parámetro que no presenta ninguna otra asociación en los demás usos del suelo y está asociado a la buena salud de los cuerpos de agua (Xia, Liu y Zao, 2012; Ding *et al.*, 2015; Mello *et al.*, 2018).

El oxígeno disuelto es una de las características más importantes para la integridad biológica del medio ambiente acuático (Brooks *et al.*, 2012), esta misma relación fue encontrada en el estudio de Mello *et al.* (2018), donde relacionó concentraciones de distintos parámetros de calidad del agua - oxígeno disuelto, nitrógeno total, fósforo total, SST, *E.coli*, entre otros - en microcuencas con diferentes grados de conservación de la cubierta forestal, donde, incluso microcuencas con áreas agrícolas pero con predominancia forestal mostraron una mejor calidad del agua que, microcuencas con poca cubierta forestal sin áreas agrícolas.

La cubierta forestal conservada es predictora de buena calidad del agua en varios estudios, Bu *et al.* (2014) y Ding *et al.* (2015) señalan que esta asociación es debido al bajo impacto antropogénico que hay en el bosque. Además, el bosque y la vegetación ribereña actúan como una zona de retención de nutrientes, los cuáles son asimilados por microorganismos y plantas que evitan su acumulación aguas abajo (Gardner y McGlynn, 2009; Ding *et al.*, 2015) así como la erosión del suelo y acumulación de

sedimentos en los cuerpos de agua (Mello et al., 2018). Lo contrario sucede dentro de áreas urbanas o agrícolas altamente degradadas, con grandes cargas de nutrientes y poca retención de estos, afectando directamente la calidad del agua (Bu et al. 2014; Ding et al. 2015).

Los parámetros asociados a la categoría de ganadería extensiva, que está representada por pastizales naturales, han sido en mayor parte iones, en todos los casos con una correlación negativa. Fosfatos y cloruros en temporada de lluvias, mientras que fluoruro, sodio, potasio, magnesio, alcalinidad, dureza y conductividad eléctrica en temporada de lluvias y secas. Esto puede explicarse con lo señalado por Hooda *et al.* (2000); Valenzuela *et al.*, (2012) y Luzardo *et al.*, (2014) que refieren una aportación de nutrientes (N, P, K) a causa de las excretas del ganado que son arrastradas por la escorrentía, de descargas residuales, suelos agrícolas y de tipos de suelo que no retengan nutrientes.

En nuestra área de estudio la ganadería se lleva a cabo de manera extensiva, tanto en pastizales naturales como en claros dentro del bosque, con ganado de libre pastoreo para autoconsumo. Como parte de esta ganadería extensiva se presenta incluso dentro de la zona núcleo del área protegida, la problemática se centra en los impactos negativos que tengan sobre la regeneración del arbolado, la eficiencia de las prácticas de restauración de la cubierta forestal y la conservación de especies prioritarias protegidas como el Ajolote Michoacana (*Ambystom aordinarium*) y Siredón de Toluca (*Ambystoma rivularis*), sujetas a Protección Especial dentro del listado de especies de la NOM-059-SEMARNAT-2010. Es importante poner en un contexto de protección y prevención los cuerpos de agua expuestos al pastoreo de ganado dentro de un área natural protegida.

#### Calidad del agua

Con base en la legislación ambiental vigente (CE-CCA-001/089, 1989; NOM-127-SSA1-1994) cuatro parámetros del estudio han sobrepasado los límites permisibles para el consumo humano; los coliformes fecales y totales, la turbidez y los fosfatos. A pesar de que en este estudio son solamente cuatro los parámetros que disminuyen la calidad del agua, estos parámetros son considerados de prioritario control, asociados a enfermedades gastrointestinales que afectan la salud humana, y a pérdidas y deterioro de los ecosistemas (Bordalo, Nilsumranchit y Chalermwat, 2001; Samboni, Carvajal y Escobar, 2007; Khatri, Tyagi y Rawtani, 2016).

De acuerdo con los resultados que arrojó el ICA, para consumo humano, la calidad del agua de al menos la mitad de los sitios en cada microcuenca se posiciona como “Aceptable” y la otra mitad como “Levemente Contaminada” lo que de acuerdo con los criterios de Dinius (1987) significa que con una mínima purificación que se aplique puede ser consumida. El sitio de La Segundita se encuentra dentro de la categoría “Contaminada”, lo cual indica un tratamiento de potabilización.

En lo que respecta a su uso para la producción agrícola y para el desarrollo de la vida acuática, la calidad del agua para la mayoría de los sitios se encuentra en una condición de “Excelente” y “Aceptable”, a excepción nuevamente del sitio de La Segundita, el cual para el uso agrícola en temporada de lluvias se encuentra dentro de la categoría “Levemente Contaminado”. No obstante, los valores para este sitio en el uso agrícola se muestran como “utilizable en la mayoría de los cultivos”, lo cual, consultando los límites máximos permisibles de los criterios ecológicos (CE-CCA-001/89) para el uso agrícola, todos los valores de los parámetros utilizados en el cálculo del ICA están dentro del rango establecido. Lo anterior coincide con los valores de calificación propuestos por Dinius (1987) en donde los criterios de calificación para estos dos usos, indican tratamiento de aguas para valores de concentraciones diferentes a las de consumo humano.

Recomendaciones para la pertinencia de los sitios de monitoreo y principales indicadores de calidad del agua

Por medio de las variaciones espaciales y temporales que resultaron significativamente diferentes es posible indicar la necesidad de un muestreo temporal, así como detectar los parámetros y sitios más característicos de cada microcuenca. Con base en la Tabla 11, las microcuencas de Palo Amargoso, La Segundita y La Mina son las únicas que el muestreo en dos temporadas del año (lluvias y secas) es indistinto, pues no tienen diferencia significativa los resultados contrastados en ambas temporadas, esto ayuda a reducir el esfuerzo de muestreo a solo una fecha del año. El resto de las microcuencas si presentan diferencias estacionales significativas en alguno de los parámetros evaluados.

Se deben de considerar los tipos de cuerpo de agua, si es manantial o arroyo, y a que uso está destinado, si el uso es consumo humano, los parámetros a evaluarse deben de corresponder a la NOM-127-SSA1-1994. Para el caso de la cuenca Palo Amargoso y La Segundita, los dos sitios que las componen (un manantial y un río), son insuficientes para una evaluación con enfoque de cuenca, faltaría agregar un sitio aguas arriba y otro después del flujo del manantial.

El control de coliformes para estos ríos y para los sitios de Arroyo Casa Grande, Ojo de Agua 2, La Entrada, Xorejé y Remunrrejé debe de ser atendido a la brevedad, primero detectando la fuente emisora del contaminante y después tomando acciones para su control. Dejar de monitorear los coliformes hasta tomadas las medidas y reportar el esperado retroceso, así como agregar medición de caudal, nitratos y fosfatos, asociados al visible cambio en las microcuencas de extensión de cultivos perennes.

Con el manantial “La Mina” se sugiere detener sus mediciones, y relacionar resultados con otros estudios que vinculen a la geología y edafología del área. El tiempo de monitoreo que se tiene a la fecha, puede ser suficiente para concluir que su problemática de contaminación -de acuerdo a los parámetros en los que presenta valores altos- se deba al estancamiento del agua de lluvia y a la influencia de otros factores, así también puede estar relacionado a ser un manantial de vía larga (regional) (Peters y Meybeck, 2000) y haber transportado contaminantes geoquímicos de otra ubicación geográfica, pues en cuanto a coliformes fecales se refiere, es el sitio más limpio.

Un continuo monitoreo para los sitios de la microcuenca Senguio podrían ser el oxígeno disuelto, los nitratos, los fosfatos, y además agregar sólidos disueltos totales y caudal. Esta recomendación dirigida por el gradiente altitudinal donde se encuentran los sitios, así como por el resultado de diferencias estacionales significativas. Considerar agregar un sitio donde se pueda monitorear la calidad del agua después del recorrido por toda la cuenca, por ejemplo, sitio con coordenadas 356134 X 2187156 Y (UTM zona 14).

La microcuenca Zitácuaro solamente presentó diferencias significativas temporales en turbidez y sodio, no obstante, los valores de estos parámetros -en especial la turbidez- son de los más bajos comparados con todos los sitios. Para esta microcuenca todos los sitios son utilizados como consumo humano, el flujo del sitio La Presa, además, es utilizado para producción de trucha, y dentro de los sitios Ojo de Agua SJZ y Ojo de Agua del Aguacate también son utilizados para actividades domésticas como el lavado de trastes y ropa. La importancia de los sitios es notable, sin embargo, el sitio La Presa se ha dejado de monitorear por razones ajenas a la RMCA. En esta microcuenca, es importante agregar sitios de monitoreo a la salida de los flujos de agua que provienen de los sitios actualmente monitoreados, pues la carga de contaminantes a causa de la producción de truchas, así como del

jabón utilizado en el lavado de ropa, podría ser una amenaza para la salud del río abajo (Simões *et al.*, 2008).

En la microcuenca Del Llano los parámetros más representativos con base en la variabilidad temporal son 4 (alcalinidad, dureza, C.E. y calcio), los cuales al resultar con variaciones significativas implican un riesgo para el hábitat de los axolotes que habitan en las pozas monitoreadas. Estos sitios forman parte del monitoreo biológico de CONANP, en este caso dedicado a la conservación del axolote. Por lo tanto, la elección de parámetros de monitoreo de calidad debe de ser dirigida a esta razón. De acuerdo con Mena González y Servín Zamora (2014) para mantener un hábitat ideal y una buena salud del axolote, se deben mantener monitoreados parámetros físico-químicos como: el pH, nitritos, nitratos, amonía, oxígeno disuelto, cloro, dureza y temperatura. Considerando la variabilidad espacial de las cuatro pozas, el comportamiento de los parámetros es similar entre Villalobos poza 8 y Villalobos poza 6, lo mismo que ocurre entre la poza 1 y 6 de El Establo, esto en parte explicado por la corta distancia que guardan entre ambos sitios de cada zona. Mantener las cuatro pozas para el monitoreo biológico es indispensable, en el caso del monitoreo de la calidad del agua se pueden representar solamente con Villalobos poza 6 y El Establo poza 8, podría considerarse mantener un monitoreo con una temporalidad mayor donde se incluyan los cuatro sitios o un monitoreo normal (bimestral) para los dos sitios propuestos.

Finalmente, una consideración indispensable y general dirigida a todas las microcuencas para todos los sitios que mantengan corriente superficial, es agregar monitoreo de caudal, a través de la toma de mediciones de velocidad de flujo, ancho y profundidad del río en cada temporada del año. Esto permitiría registrar y documentar los desvíos de agua para el riego agrícola, lo cual ya es algo enteramente visible en el sitio La Entrada (Anexo II), lo que pone en riesgo el caudal ecológico<sup>1</sup> y por lo tanto amenaza los bienes y servicios a la sociedad, así como a los ecosistemas acuáticos (WWF, 2010).

---

<sup>1</sup> Para la definición y determinación de caudal ecológico consultar la Norma NMX-AA-159-SCFI-2012

## CONCLUSIONES

El enfoque de cuenca nos permitió conocer las relaciones que guardan distintos parámetros de la calidad del agua con los usos del suelo en cuencas de la RBMM. Se distinguieron siete microcuencas de gran importancia para la recarga de acuíferos y para las comunidades que habitan el área de estudio. El coeficiente correlación Spearman ( $p < 0.05$ ) mostró resultados para cada tipo de uso del suelo analizado, donde, por ejemplo, se pudo discutir a través de la correlación positiva con el oxígeno disuelto la influencia que tiene la cubierta forestal en la calidad del agua, el cual se asocia con la buena salud de los cuerpos de agua. Mientras que los resultados de correlación entre nutrientes y plantaciones arbóreas apoyan el impacto negativo de los fertilizantes y agroquímicos sobre los cuerpos de agua.

Estos temas generan un creciente dilema entre la población del oriente de Michoacán, por un lado, la salud de los pobladores que se abastecen directamente de esos cuerpos de agua es una preocupación constante, por otro lado, la falta de alternativas sustentables para los agricultores de la zona no genera otras opciones de producción, lo cual es para un gran número de familias, la principal fuente de ingresos.

Lo anterior muestra la importancia de este tipo de estudios para los tomadores de decisiones, donde pueden identificar las áreas de oportunidad y presentar iniciativas basadas en estudios confiables de calidad. Este trabajo ha presentado resultados estadísticos de la relación entre la calidad del agua y usos del suelo a nivel de microcuenca. Si bien, estas relaciones no hablan de una causa-efecto, la discusión fundamentada en literatura especializada nos acerca a una realidad de las consecuencias que tienen las actividades antrópicas sobre la calidad del agua. De la misma manera, se muestra la importancia de utilizar una unidad de manejo adecuada, que responda a las bases de datos disponibles, para que estas a su vez tengan un aprovechamiento múltiple.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Abbasi, T. y Abbasi, S. a. (2012) "Why Water-Quality Indices", en *Water Quality Indices*. Gran Bretaña: Elsevier Ltd, pp. 3–7. doi: 10.1016/B978-0-444-54304-2.00001-4.
- Ahearn, D. S. *et al.* (2005) "Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California", *Journal of Hydrology*, 313(3–4), pp. 234–247. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.038.
- Albert, L. A. (1997) "Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos", *ECO. Introducción a la toxicología ambiental. Metepec*, pp. 37–52. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf>.
- Ayala Morales, L. (2014) *Determinación de las concentraciones de iones presentes en el agua lluvia de la zona urbana de la Ciudad de Cuenca causantes de la lluvia ácida*. Universidad Politécnica Salesiana. Sede Cuenca.
- Beamonte, E., Casino, A. y Veres, E. (2010) "Water quality indicators: Comparison of a probabilistic index and a general quality index. The case of the Confederación Hidrográfica del Júcar (Spain)", *Ecological Indicators*, 10(5), pp. 1049–1054. doi: 10.1016/j.ecolind.2010.01.013.
- Black, P. E. (1997) "Watershed functions", *Journal of the American water Resources Association*, 33(1).
- Bordalo, A. A., Nilsumranchit, W. y Chalermwat, K. (2001) "Water quality and uses of the Bangpakong River (Eastern Thailand)", *Water Research*, 35(15), pp. 3635–3642. doi: 10.1016/S0043-1354(01)00079-3.
- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F. y Magner, J. A. (2013) *Hydrology and the Management of Watersheds*. Cuarta, *Soil Science*. Cuarta. doi: 10.1097/01.ss.0000100476.96182.cd.
- Bu, H. *et al.* (2014) "Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China", *Ecological Indicators*. Elsevier Ltd, 41, pp. 187–197. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.02.003.
- Bunge, V. *et al.* (2015) "Incorporación del enfoque de cuencas en los ordenamientos ecológicos", en Burgos, A., Bocco, G., y Sosa-Ramírez, J. (eds.) *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas*2. México: CIGA-UNAM, p. 318.
- Burgos, A. *et al.* (2013) "A systems approach to modeling Community-Based Environmental Monitoring: A case of participatory water quality monitoring in rural Mexico", *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(12), pp. 10297–10316. doi: 10.1007/s10661-013-3333-x.
- Burgos, A. y Bocco, G. (2015) "La cuenca hidrográfica como espacio geográfico", en Burgos, A., Bocco, G., y Sosa-Ramírez, J. (eds.) *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas*. Primera Ed. México: UNAM/CIGA, pp. 11–29.
- Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L. y España-Boquera, M. L. (2012) "Pérdida De Cobertura Forestal En La Reserva De La Biósfera Mariposa Monarca, Michoacán, México (2006-2010) .", *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(2), pp. 143–157. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.09.074.
- Chapman, D. y Kimstach, V. (1996) "Selection of water quality variables", en Chapman, D. (ed.) *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota , Sediments and Water in Environmental Monitoring*. second Edi. Londres: UNESCO/WHO/UNEP.

- Chediack, S. E. (2009) *Monitoreo de biodiversidad y recursos naturales: ¿para qué?*, Conabio. Disponible en: [http://www.oikos.unam.mx/LECT/images/Libros/mmrjrgj\\_2009.pdf](http://www.oikos.unam.mx/LECT/images/Libros/mmrjrgj_2009.pdf).
- Chen, J. y Lu, J. (2014) "Effects of land use, topography and socio-economic factors on river water quality in a mountainous watershed with intensive agricultural production in East China", *PLoS ONE*, 9(8), pp. 1–12. doi: 10.1371/journal.pone.0102714.
- CONANP (2001) "Programa De Manejo De La Reserva De La Biosfera Mariposa Monarca".
- Cotler, H. (2015) "Incidencia del enfoque de cuencas en las políticas públicas de México.", en *Dimensiones sociales en el manejo de cuencas2*. México: CIGA-UNAM, pp. 31–43.
- Cotler, H. y Caire, G. (2009) *Lecciones aprendidas del manejo de cuencas en México, Instituto Nacional de Ecología, Organización Mundial ....* doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- Cotler, H. y Priego, Á. (2004) "El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas : el caso de la cuenca Lerma-Chapala", en Cotler, H. (ed.) *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Primera Ed. México: INE-SEMARNAT, pp. 79–89.
- Custodio, E. (2001) "Hidrogeoquímica", en Custodio, E. y Llamas, M. R. (eds.) *Agua Subterránea*. Segunda. Barcelona: Omega, pp. 1005–1091.
- Cuthill, M. (2000) "An interpretive approach to developing volunteer-based coastal monitoring programmes", *Local Environment*, 5(2), pp. 127–137. doi: 10.1080/13549830050009300.
- Davis, J. S. y Zobrist, J. (1978) "The interrelationships among chemical parameters in rivers - analysing the effect of natural and anthropogenic sources", en *Ninth International Conference on Water Pollution Research*. Estocolmo: Pergamon, pp. 65–78.
- DeBarry, P. A. (2004) *Watersheds: processes, assessments, and management*. Estados Unidos de América: John Wiley & Sons.
- Deutsch, W. ., Ruiz-Córdova, S. S. y Duncan, B. L. (2010) *Community-Based Water Monitoring: A Practical Model for Global Watershed Stewardship*. Auburn: Global Water Watch Program, Auburn University.
- Ding, J. *et al.* (2015) "Impacts of Land Use on Surface Water Quality in a Subtropical River Basin: A Case Study of the Dongjiang River Basin, Southeastern China", *Water*, 7(8), pp. 4427–4445. doi: 10.3390/w7084427.
- Dinius, S. H. (1987) "Design of an Index of Water Quality", *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 23(5), pp. 833–843. doi: 10.1111/j.1752-1688.1987.tb02959.x.
- Ellis, E. y Pontius, R. (2007) "Land-Use and Land-Cover Change", en Cutler, J. C. (ed.) *The Encyclopedia of Earth*. Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment, pp. 1–7. doi: 10.1623/hysj.2005.50.6.1069.
- FAO (2009a) *¿Por qué invertir en la ordenación de las Cuencas Hidrográficas?*, Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación. Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/012/a1295s/a1295s01.pdf>.
- FAO (2009b) "Repercusiones humanas y naturales en los procesos de las cuencas hidrográficas: una cuestión

de escalas”, pp. 25–28.

Flores-díaz, A. C. *et al.* (2013) “Monitoreo Comunitario Del Agua : Retos Y Aprendizaje Desde La Perspectiva De Global Water Watch-México .”, en *Congreso Nacional de Manejo Cuencas Hidrográficas*. Xalapa, México.

Flores-Díaz, A. C. *et al.* (2018) “Community-based monitoring in response to local concerns: Creating usable knowledge for water management in rural land”, *Water (Switzerland)*, 10(5), pp. 1–15. doi: 10.3390/w10050542.

García, M. E. *et al.* (2006) “Influencia de los contaminantes SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> en la formación de lluvia ácida en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México”, *e-Gnosis Universidad de Guadalajara*, (4), pp. 1–160.

Gardner, K. K. y McGlynn, B. L. (2009) “Seasonality in spatial variability and influence of land use/land cover and watershed characteristics on stream water nitrate concentrations in a developing watershed in the Rocky Mountain West”, *Water Resources Research*, 45(8), pp. 1–14. doi: 10.1029/2008WR007029.

Garrido, A., Pérez, J. L. y Enríquez, C. (2010) “Delimitación de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México”, en Cotler, H. (ed.) *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. México: SEMARNAT/INE/Fundación Gonzalo Río Arronte, pp. 14–17.

Guzmán-Colis, G. *et al.* (2011) “EVALUACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO SAN PEDRO EN EL ESTADO DE AGUASCALIENTES, MÉXICO”, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(2), pp. 89–102.

Honey-Rosés, J. *et al.* (2018) “Quantifying active and passive restoration in central Mexico from 1986-2012: Assessing the evidence of a forest transition”, *Restoration Ecology*, pp. 1–10. doi: 10.1111/rec.12703.

Honey-Rosés, J., Baylis, K. y Ramírez, M. I. (2011) “A Spatially Explicit Estimate of Avoided Forest Loss”, *Conservation Biology*, 25(5), pp. 1032–1043. doi: 10.1111/j.1523-1739.2011.01729.x.

Hooda, P. S. *et al.* (2000) “A review of water quality concerns in livestock farming areas”, *Sci Total Environ*, 250, pp. 143–167.

INECC (1996) *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: Reserva Especial de la Biosfera Mariposa Monarca*. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/2/monarca.html>.

Ives, J. D. y Messerli, B. (1990) “The Himalayan dilemma: Reconciling development and conservation”, *United Nations University*, 7(1), p. 272. doi: 10.1016/0264-8377(90)90063-5.

Jiménez Cisneros, B. E. (2001) *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA.

Khatri, N., Tyagi, S. y Rawtani, D. (2016) “Assessment of Drinking Water Quality and its Health Effects in Rural Areas of Harij Taluka , Patan District of Northern Gujarat”, *Environmental Claims Journal*. Taylor & Francis, 28(3), pp. 223–246. doi: 10.1080/10406026.2016.1190249.

Kiersch, B. (2002) “Land use impacts on water resources: a literature review”, en FAO (ed.) *Land-water linkages in rural watersheds*. Roma, Italia, pp. 33–44.

- Knee, K. L. y Encalada, A. C. (2014) "Land use and water quality in a rural cloud forest region (Intag, Ecuador)", *River Res. Applic.*, 30(2), pp. 385–401. doi: 10.1002/rra.2634.
- Li, S. *et al.* (2008) "Water quality in relation to land use and land cover in the upper Han River Basin, China", *Catena*, 75(2), pp. 216–222. doi: 10.1016/j.catena.2008.06.005.
- Li, S. *et al.* (2013) "Effects of Catchment and Riparian Landscape Setting on Water Chemistry and Seasonal Evolution of Water Quality in the Upper Han River Basin, China", *PLOS ONE*, 8(1). doi: 10.1371/journal.pone.0053163.
- Luzardo, O. *et al.* (2014) "Impacto de las instalaciones ganaderas sobre la calidad y seguridad del agua subterránea", *Revista de Toxicología*, 31(1), pp. 39–46. Disponible en: <http://ojs.diffundit.com/index.php/revtoxicol/article/view/629/555>.
- Maass, M. (2003) "El agua como elemento integrador de los procesos funcionales del ecosistema", en Ávila, P. (ed.) *Agua, medio ambiente y desarrollo en el siglo XXI*. Zamora, Michoacán: Colegio de Michoacán: Secretaria de Urbanismo y Medio Ambiente: SEMARNAT/ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, pp. 109–116.
- Mas, J. F. *et al.* (2017) "Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT", *Madera Bosques*, 23(2), pp. 119–131. doi: 10.21829/myb.2017.2321472.
- Mello, K. de *et al.* (2018) "Impacts of tropical forest cover on water quality in agricultural watersheds in southeastern Brazil", *Ecological Indicators*. Elsevier, 93(December 2017), pp. 1293–1301. doi: 10.1016/j.ecolind.2018.06.030.
- Mena González, H. y Servín Zamora, E. (2014) *Manual básico para el cuidado en cautiverio del axolote de Xochimilco (Ambystoma mexicanum)*. Primera Ed, Instituto de Biología - Universidad Nacional Autónoma de México. Primera Ed. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología.
- Meybeck, M. *et al.* (1996) "Rivers", en Chapman, D. (ed.) *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Segunda Ed. Londres: UNESCO/WHO/UNEP, p. 609.
- Meybeck, M. y Helmer, R. (1996) "An introduction to water quality", en Chapman, D. (ed.) *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Second Edi. Cambridge: UNESCO/WHO/UNEP, p. 609.
- Meybeck, M., Kimstach, V. y Helmer, K. (1996) "Strategies for water quality assessment", en Chapman, D. (ed.) *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Londres: UNESCO/WHO/UNEP.
- Mostertman, L. J. (1977) "Water quality: an overview", *Agro-Ecosystems*, 3, pp. 239–251.
- Napierala, M. y Matthew, A. (2012) "What Is the Bonferroni Correction ?", *AAOS Now*, 6(4), p. 40. Disponible en: <http://www.aaos.org/news/aaosnow/apr12/research7.asp>.
- Navarrete, J. L., Ramírez, M. I. y Pérez-Salicrup, D. R. (2011) "Logging within protected areas: Spatial evaluation of the monarch butterfly biosphere reserve, Mexico", *Forest Ecology and Management*, 262(4), pp. 646–654. doi: 10.1016/j.foreco.2011.04.033.

- Oki, T. y Kanae, S. (2006) "Global Hydrological Cycles and World Water Resources", *Science*, 313(5790), pp. 1068–1072. doi: 10.1126/science.1128845.
- OMS, O. M. de la S. (1996) *Water quality monitoring- A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes*. Editado por J. Bartram y R. Ballance. UNEPWHO. doi: 10.1002/ejoc.201200111.
- OMS, O. M. de la S. (2018) *Agua, 7 febrero 2018*. Disponible en: <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> (Consultado: el 11 de junio de 2018).
- Páez, R. *et al.* (2011) "Monitoreo comunitario de la calidad del agua en cuencas rurales del Bajo Balsas".
- Páez, R., Ramírez, M. I. y Flores-Díaz, A. C. (2015) "La calidad del agua en cuatro microcuencas de la reserva de la Biosfera Mariposa Monarca", en *Memorias del 10° Congreso Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación*. Morelia, Michoacán, pp. 252–259.
- Palmberg-Lerche, C. (1999) "Conservation and management of forest genetic resources in Europe", *Journal of Tropical Forest Science*, 11(1), pp. 286–302. Disponible en: <http://biorescon.com/files/Conservation and Management of Forest Genetic Resources in Europe.pdf>.
- Perevochtchikova, M. (2009) *La situación actual del sistema de monitoreo ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Estudios demográficos y urbanos*.
- Perevochtchikova, M. *et al.* (2016) "Monitoreo comunitario participativo de la calidad del agua: caso Ajusco, México TT - Community Participatory Monitoring of Water Quality: Case Ajusco, Mexico", *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6), pp. 5–23. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-2422016000600005&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n6/2007-2422-tca-7-06-00005.pdf](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-2422016000600005&lang=pt%0Ahttp://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v7n6/2007-2422-tca-7-06-00005.pdf).
- Peters, N. y Meybeck, M. (2000) "International Water Resources Association Water Quality Degradation Effects on Freshwater Availability: Impacts of Human Activities", *Water International*, 25(2), pp. 185–193. doi: 10.1080/02508060008686817.
- Peters, N. y Meybeck, M. (2000) "Water quality degradation effects on freshwater availability: Impacts of human activities", *Water International*, 25(2), pp. 185–193. doi: 10.1080/02508060008686817.
- Ramírez, I. (2001) "Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo , Michoacán y Estado de México , 1971 -1 994- Land-covers changes in the Angangueo mountain range , Michoacán and State of Mexico , 1971 -1 994-2000", *Investigaciones Geográficas*, 45, pp. 39–55.
- Ramírez, M. I. (2001) *Los Espacios Forestales de la Sierra de Angangueo (Estados de Michoacán y México), México: Una Revisión Geográfica*. Universidad Complutense de Madrid.
- Ramírez, M. I. *et al.* (2007) "Land Cover and Road Network Map for the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico , 2003 Land Cover and Road Network Map for the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico , 2003", *Journal of Maps*, pp. 181–190.
- Ramírez, M. I. *et al.* (2015) "Threats to the availability of overwintering habitat in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve", en Oberhauser, K. S., Nail, K. R., y Altizer, S. (eds.) *Monarchs in a changing world*.

- Biology and conservation of an iconic butterfly*. Nueva York, p. 312. doi: 10.1073/pnas.0703993104.
- Ramírez, M. I., Azcárate, J. G. y Luna, L. (2003) "Effects of human activities on monarch butterfly habitat in protected mountain forests , Mexico Effects of human activities on monarch butterfly habitat in protected mountain forests , Mexico 1", 79(April 2014), pp. 242–246. doi: 10.5558/tfc79242-2.
- Ramírez, M. I., Miranda, R. y Zubieta, R. (2008) *Vegetación y Cubiertas del Suelo, 2006 (1:75000), Serie Cartográfica Monarca, Volumen I, MBSF-CIGA-UNAM-INE-SEMARNAT-UNESCO*. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones>.
- Ramirez y Zubieta (2005) "Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Región Mariposa Monarca Informe Técnico Final", *Instituto de Geografía, UNAM*, p. 52.
- Reder, K., Flörke, M. y Alcamo, J. (2015) "Modeling historical fecal coliform loadings to large European rivers and resulting in-stream concentrations", *Environmental Modelling and Software*, 63, pp. 251–263. doi: 10.1016/j.envsoft.2014.10.001.
- Rindfuss, R. R. *et al.* (2004) "Developing a Science of Land Change : Challenges and Methodological Issues", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(39), pp. 13976–13981. doi: 10.1073/pnas.0401545101.
- Salitchev, K. (1979) *Cartografía*. La Habana, Cuba: Pueblo y Educación.
- Samboni, N., Carvajal, Y. y Escobar, J. C. (2007) "Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua", *Revista Ingeniería e Investigación*, 27(3), pp. 172–181. doi: 0120-5609.
- Sedeño-Díaz, J. E. y López-López, E. (2007) "Water quality in the Río Lerma, Mexico: An overview of the last quarter of the twentieth century", *Water Resources Management*, 21(10), pp. 1797–1812. doi: 10.1007/s11269-006-9128-x.
- Simões, F. dos S. *et al.* (2008) "Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies", *Ecological Indicators*, 8(5), pp. 476–484. doi: 10.1016/j.ecolind.2007.05.002.
- Sliva, L. y Williams, D. D. (2001) "BUFFER ZONE VERSUS WHOLE CATCHMENT APPROACHES TO STUDYING LAND USE IMPACT ON RIVER WATER QUALITY", *Pergamon*, 35(14), pp. 3462–3472.
- Stambuk-Giljanovic, N. (1999) "Water quality evaluation by index in Dalmatia", *Water Research*, 33(16), pp. 3423–3440. doi: 10.1016/S0043-1354(99)00063-9.
- Tapia Vargas, L. M. *et al.* (2005) *Consideraciones prácticas para el manejo del nutririego del aguacate en Michoacán*. Uruapan, Michoacán: SAGARPA-INIFAP. Disponible en: [https://www.cofupro.org.mx/cofupro/archivo/fondo\\_sectorial/Michoacan/6michoacan.pdf](https://www.cofupro.org.mx/cofupro/archivo/fondo_sectorial/Michoacan/6michoacan.pdf).
- Turner, B. L., Lambin, E. F. y Reenberg, A. (2007) "The emergence of land change science for global environmental change and sustainability", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(52), pp. 20666–20671.
- Turner, B. L., Meyer, W. B. y Skole, D. L. (1994) "Global land-use land-cover change - towards an integrated study", *Ambio*, 23(1), pp. 91–95. doi: 10.2307/4314168.

- Valenzuela, E. *et al.* (2012) “[Microbiological quality of water in livestock area of southern Chile and its possible implications on human health].”, *Revista chilena de infectología : órgano oficial de la Sociedad Chilena de Infectología*, 29(6), pp. 628–34. doi: 10.4067/S0716-10182012000700007.
- Velázquez, A. *et al.* (2002) “Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México”, *Gaceta Ecológica*, 062, pp. 21–37. doi: 10.4067/S0718-23762009000200004.
- Velázquez, A. y Larrazábal, A. (2006) *Propuesta de Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Mariposa Monarca*. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geografía.
- Vidal, O., López-García, J. y Rendón-Salinas, E. (2014) “Trends in Deforestation and Forest Degradation after a Decade of Monitoring in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve in Mexico”, *Conservation Biology*, 28(1), pp. 177–186. doi: 10.1111/cobi.12138.
- Wang, X. (2001) “Integrating water-quality management and land-use planning in a watershed context”, *Journal of Environmental Management*, 61(1), pp. 25–36. doi: 10.1006/jema.2000.0395.
- WWF-FCMM (2009) “Deforestación y degradación forestal en la zona núcleo de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca 2008-2009”, (i), pp. 2008–2010.
- WWF-FCMM (2010) *Cambio de la cobertura forestal en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca 2009-2010*.
- WWF-FM (2012) *Degradación y pérdida forestal en la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca 2011-2012*.
- WWF (2004) “La Tala Ilegal y su Impacto en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca”, pp. 1–36.
- WWF (2006) “Pérdida y deterioro de los bosques en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca 2005-2006”, pp. 1–8.
- Xia, L. L., Liu, R. Z. y Zao, Y. W. (2012) “Correlation Analysis of Landscape Pattern and Water Quality in Baiyangdian Watershed”, *Procedia Environmental Sciences*, 13(2011), pp. 2188–2196. doi: 10.1016/j.proenv.2012.01.208.
- Yong, S. T. Y. y Chen, W. (2002) “Modeling the relationship between land use and surface water quality”, *Journal of Environmental Management*, 66(4), pp. 377–393. doi: 10.1006/jema.2002.0593.

## ANEXOS

Anexo I. Rangos de parámetros de calidad el agua que sobrepasan los límites máximos permisibles.

Parámetro	Estadística descriptiva	Microcuenca Senguio									
		Los Tubos		El Salto		Los Ailes		Los Filtros		Agua Caliente-	
		Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
Fosfatos	Promedio	0.21	0.19	0.28	0.24	0.13	0.27	0.24	0.23	0.12	0.25
	Desviación.E.	0.27	0.20	0.33	0.08	0.15	0.14	0.30	0.08	0.13	0.07
	Mín	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.09	0.00	0.11	0.00	0.13
	Máx	0.64	0.46	0.74	0.38	0.26	0.42	0.67	0.34	0.31	0.36
Turbidez	Promedio	0.94	5.43	0.74	4.80	16.16	14.30	3.64	13.29	6.04	12.08
	Desviación.E.	0.35	4.51	0.35	3.64	11.50	4.64	2.71	5.08	2.57	2.15
	Mín	0.63	2.64	0.43	0.56	5.95	8.02	1.07	4.86	3.34	8.39
	Máx	1.56	14.50	1.34	10.90	32.00	21.60	7.57	18.70	9.59	14.60
Col. Fecales	Promedio	62	25	32	42	211	360	136	117	153	146
	Desviación.E.	80	22	64	35	155	310	137	55	99	126
	Mín	0	0	0	0	67	123	26	60	24	63
	Máx	205	59	163	97	420	800	380	200	283	400
Col. Totales	Promedio	363	410	563	723	430	456	372	309	360	260
	Desviación.E.	411	445	675	706	441	242	528	400	349	263
	Mín	8	19	5	51	57	103	15	13	38	17
	Máx	1167	1173	1867	1933	1150	733	1367	1097	967	733

Parámetro	Estadística descriptiva	Microcuenca Del Llano							
		El Establo Poza 6		El Establo Poza 8		Villalobos Poza 1		Villalobos Poza 8	
		Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
Fosfatos	Promedio	0.17	0.23	0.18	0.13	0.18	0.22	0.21	0.13
	Desviación.E.	0.25	0.08	0.23	0.09	0.22	0.07	0.19	0.12
	Mín	0.00	0.08	0.00	0.06	0.00	0.09	0.00	0.05
	Máx	0.54	0.31	0.43	0.19	0.45	0.29	0.34	0.22
Turbidez	Promedio	1.99	2.19	1.85	7.08	4.62	2.34	1.65	2.75
	Desviación.E.	0.59	0.79	0.62	6.40	5.00	1.53	0.32	0.64
	Mín	1.36	1.20	1.21	2.55	0.89	0.92	1.29	2.29
	Máx	2.88	3.07	2.44	11.60	13.60	5.18	1.86	3.20
Col. Fecales	Promedio	422	195	170	165	287	129	73	181
	Desviación.E.	604	168	101	19	465	93	104	109
	Mín	0	25	59	152	3	37	13	103
	Máx	1600	420	256	179	1200	287	193	258
Col. Totales	Promedio	421	384	195	221	537	326	296	203
	Desviación.E.	605	416	109	262	741	263	114	75
	Mín	19	25	75	36	85	140	228	150
	Máx	1600	1028	288	406	2000	849	427	256

Parámetro	Estadística descriptiva	Microcuenca Palo Amargoso			
		Río Oscuro		Palo Amargoso	
		Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
Fosfatos	Promedio	0.3	0.4	0.3	0.4
	Desviación.E.	0.4	0.3	0.4	0.3
	Mín	0.0	0.1	0.0	0.1
	Máx	1.0	0.9	0.8	0.8
Turbidez	Promedio	2.4	9.5	0.7	0.8
	Desviación.E.	2.9	5.8	0.6	0.5
	Mín	0.5	1.6	0.2	0.4
	Máx	8.1	15.6	1.7	1.6
Col. Fecales	Promedio	1567	1841	7	18
	Desviación.E.	917	968	9	39
	Mín	740	500	0	0
	Máx	2967	3000	25	97
Col. Totales	Promedio	2716	4371	24	41
	Desviación.E.	1896	1491	18	36
	Mín	233	2833	7	3
	Máx	5433	6450	53	97

Parámetro	Estadística descriptiva	Microcuenca La Segundita			
		El Manantial 1ª Manzana		La Segundita	
		Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
Fosfatos	Promedio	0.39	0.37	0.35	0.44
	Desviación.E.	0.49	0.35	0.40	0.22
	Mín	0.00	0.01	0.00	0.16
	Máx	1.12	0.92	0.82	0.73
Turbidez	Promedio	0.62	0.38	4.17	21.60
	Desviación.E.	0.59	0.25	2.27	12.11
	Mín	0.17	0.16	2.20	6.97
	Máx	1.74	0.81	8.24	43.00
Col. Fecales	Promedio	5	16	1862	2886
	Desviación.E.	5	24	1072	2106
	Mín	1	1	1033	900
	Máx	15	65	4000	6667
Col. Totales	Promedio	20	82	7894	5456
	Desviación.E.	16	134	6080	1971
	Mín	2	1	4000	2400
	Máx	50	347	20000	8000

Parámetro	Estadística descriptiva	Microcuenca La Mina											
		La Lomita		La Mina		La capilla		Arroyo Casa Grande 2		Ojo de agua 1		Ojo de agua 2	
		Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
Fosfatos	Promedio	0.30	0.20	0.66	0.25	0.31	0.43	0.04	0.42	0.26	0.45	0.19	0.43
	Desviación.E.	0.34	0.22	0.73	0.28	0.35	0.19	0.05	0.23	0.35	0.18	0.24	0.22
	Mín	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.19	0.00	0.14	0.00	0.12	0.05	0.10
	Máx	0.68	0.35	1.44	0.45	0.81	0.65	0.10	0.69	0.77	0.58	0.56	0.64
Turbidez	Promedio	0.51	0.72	1.03	0.57	0.39	1.07	0.97	4.12	0.70	0.88	0.52	0.62
	Desviación.E.	0.39	0.51	0.38	0.05	0.20	1.71	0.58	7.71	0.52	0.94	0.33	0.43
	Mín	0.18	0.35	0.66	0.53	0.17	0.18	0.21	0.16	0.34	0.19	0.29	0.21
	Máx	0.94	1.08	1.42	0.60	0.71	4.55	1.98	19.80	1.73	2.72	1.17	1.30
Col. Fecales	Promedio	25	6	15	106	87	49	1053	1491	14	18	17	77
	Desviación.E.	40	6	13	97	193	43	726	1690	18	21	14	93
	Mín	0	1	1	37	0	8	147	13	0	0	3	13
	Máx	72	10	23	174	480	102	2000	4800	48	55	37	227
Col. Totales	Promedio	62	59	14	124	199	82	925	1868	30	38	73	191
	Desviación.E.	39	83	20	166	393	49	964	1826	32	23	31	192
	Mín	23	0	0	7	20	0	75	7	6	3	41	18
	Máx	101	118	37	241	1000	123	2500	4000	89	61	123	400

Parámetro	Estadística descriptiva	Microcuenca Remunreje							
		Xorejé		Tamejé		La Entrada		Remunreje	
		Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
Fosfatos	Promedio	0.04	0.21	0.08	0.23	0.06	0.23	0.06	0.20
	Desviación.E.	0.08	0.12	0.14	0.12	0.14	0.13	0.12	0.12
	Mín	0.00	0.10	0.00	0.05	0.00	0.06	0.00	0.02
	Máx	0.18	0.37	0.29	0.41	0.31	0.44	0.31	0.29
Turbidez	Promedio	3.16	5.15	1.15	8.54	1.65	6.93	0.86	28.46
	Desviación.E.	2.91	1.71	0.74	7.78	1.00	2.74	0.41	41.40
	Mín	0.73	3.54	0.48	3.18	0.74	4.10	0.40	5.58
	Máx	7.99	8.10	2.50	24.00	3.48	11.50	1.49	110.00
Col. Fecales	Promedio	164	76	610	1082	134	30	352	1047
	Desviación.E.	92	101	567	1081	210	28	325	861
	Mín	23	20	133	333	11	0	68	207
	Máx	253	280	1567	3200	560	74	967	2600
Col. Totales	Promedio	548	507	4141	7375	263	485	638	1754
	Desviación.E.	501	517	4830	9557	244	529	468	1680
	Mín	24	47	567	800	80	47	200	80
	Máx	1167	1493	12433	26667	747	1360	1433	4100

Parámetro	Estadística descriptiva	Microcuenca Zitácuaro							
		Ojo de agua de aguacate		La Presa Nicolas Romero		El Agua de Benita		Ojo San Juan Zitácuaro	
		Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias	Secas	Lluvias
Fosfatos	Promedio	0.41	0.42	0.27	0.31	0.24	0.08	0.30	0.37
	Desviación.E.	0.36	0.39	0.26	0.30	0.28	0.02	0.51	0.43
	Mín	0.00	0.14	0.00	0.10	0.00	0.06	0.00	0.06
	Máx	0.65	0.69	0.53	0.52	0.55	0.09	0.89	0.67
Turbidez	Promedio	0.25	0.63	0.26	1.37	0.32	2.13	0.39	0.84
	Desviación.E.	0.10	0.45	0.12	1.48	0.06	0.36	0.11	0.97
	Mín	0.16	0.31	0.16	0.32	0.26	1.87	0.26	0.15
	Máx	0.36	0.95	0.40	2.42	0.36	2.38	0.46	1.53
Col. Fecales	Promedio	5	249	18	8	136	615	34	273
	Desviación.E.	6	213	20	11	150	21	33	377
	Mín	0	99	0	0	9	600	0	7
	Máx	12	400	39	16	301	629	67	540
Col. Totales	Promedio	62	625	114	73	227	1101	179	813
	Desviación.E.	81	813	77	75	219	1271	169	1141
	Mín	11	50	45	20	24	203	0	7
	Máx	155	1200	197	126	459	2000	337	1620

## Anexo II. Fotografías comparativas entre lluvias y secas

Sitio Palo Amargoso. Lluvias



Secas



Sitio El Agua de Benita. Lluvias



Secas



Sitio El Establo Poza 6. Lluvias



Secas





Sitio La Entrada. Lluvias



Secas



Desvío de caudal en sitio La Entrada



Sitio La Mina. Lluvias



Secas



Sitio La Segundita. Lluvias



Secas



Sitio La Lomita



Sitio Ojo de Agua del Aguacate. Lluvias



Secas



Sitio. Ojo de Agua San Juan Zitácuaro. Lluvias



Secas



Sitio Remunrejjé. Lluvias



Secas



Sitio Tamejé. Lluvias



Secas



Sitio Río Oscuro. Lluvias



Secas



Sitio Xorejé. Lluvias



Secas



Sitio Villalobos Poza 1. Lluvias



Secas



Sitio Villalobos Poza 8. Lluvias



Secas



Sitio Arroyo Casa Grande 2. Lluvias



Secas



Sitio La Capilla. Lluvias



Secas



Sitio Ojo de Agua 1. Lluvias



Secas



Sitio Agua Caliente-Zapatero. Lluvias



Secas



Sitio El Salto. Lluvias



Secas



Sitio Los Ailes. Lluvias



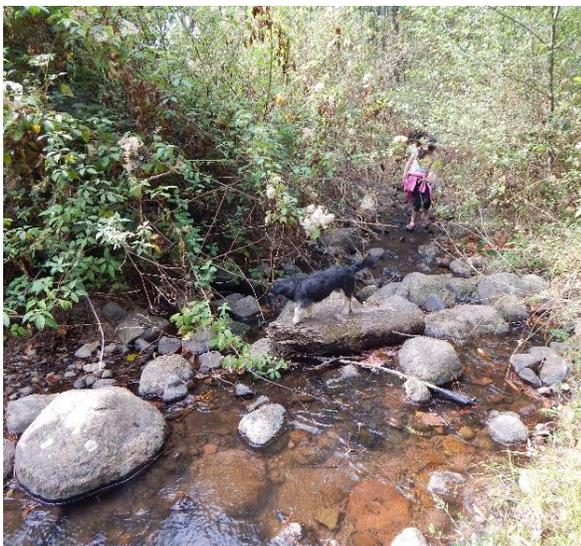
Secas



Sitio Los Filtros. Lluvias



Secas



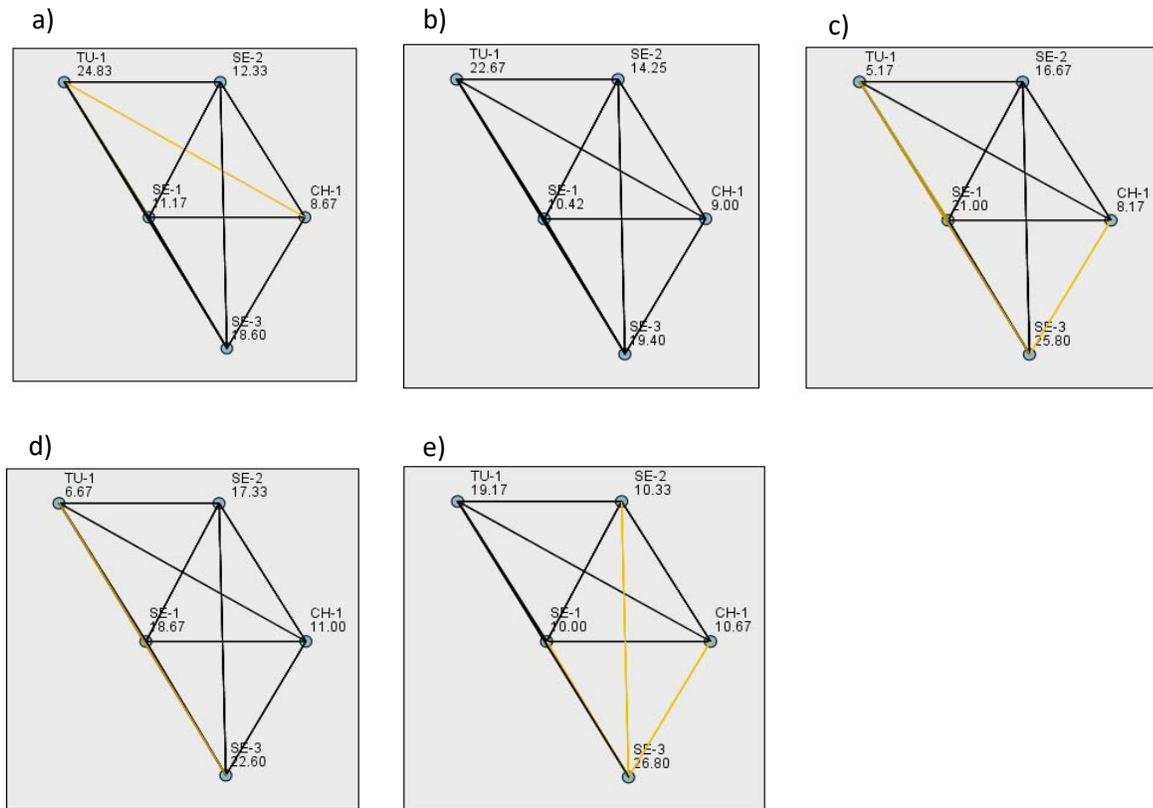
Sitio Los Tubos. Lluvias



Secas

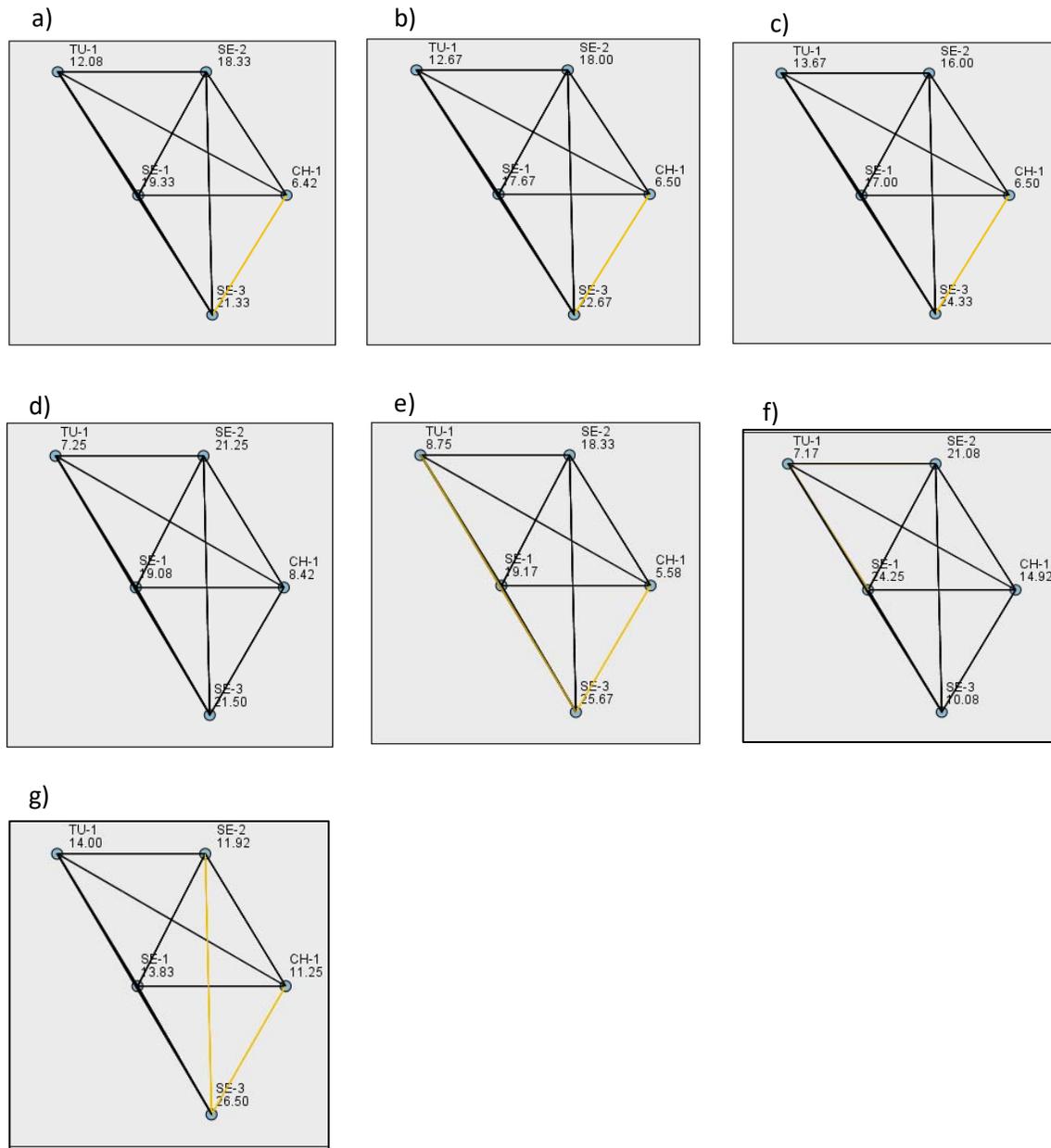


Anexo III. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Senguio en secas



Nota: Cada nodo muestra el rango promedio de muestra por sitio y la línea amarilla la diferencia significativa entre pares.  
 a) Dureza, b) C.E., c) Turbidez, d) E. coli y e) Sulfatos.

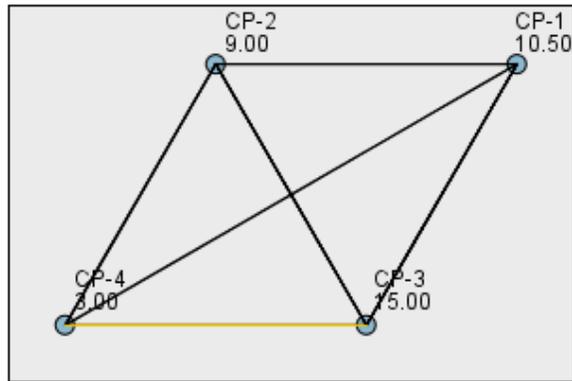
Anexo IV. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Senguio en lluvias



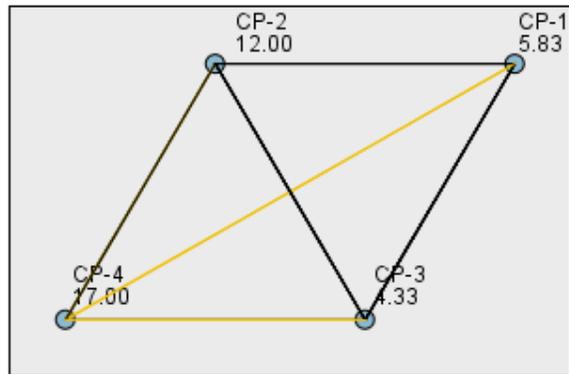
Nota: Cada nodo muestra el rango promedio de muestra por sitio y la línea amarilla la diferencia significativa entre pares.  
 a) Alcalinidad, b) Dureza, c) C.E, d) Turbidez y e) E. coli, f) Nitratos y g) Sulfatos.

Anexo V. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Del Llano en secas

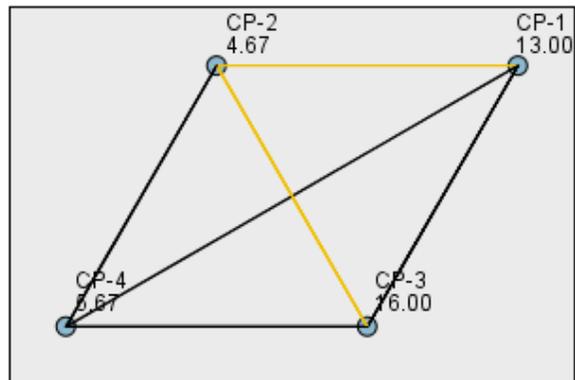
a)



b)

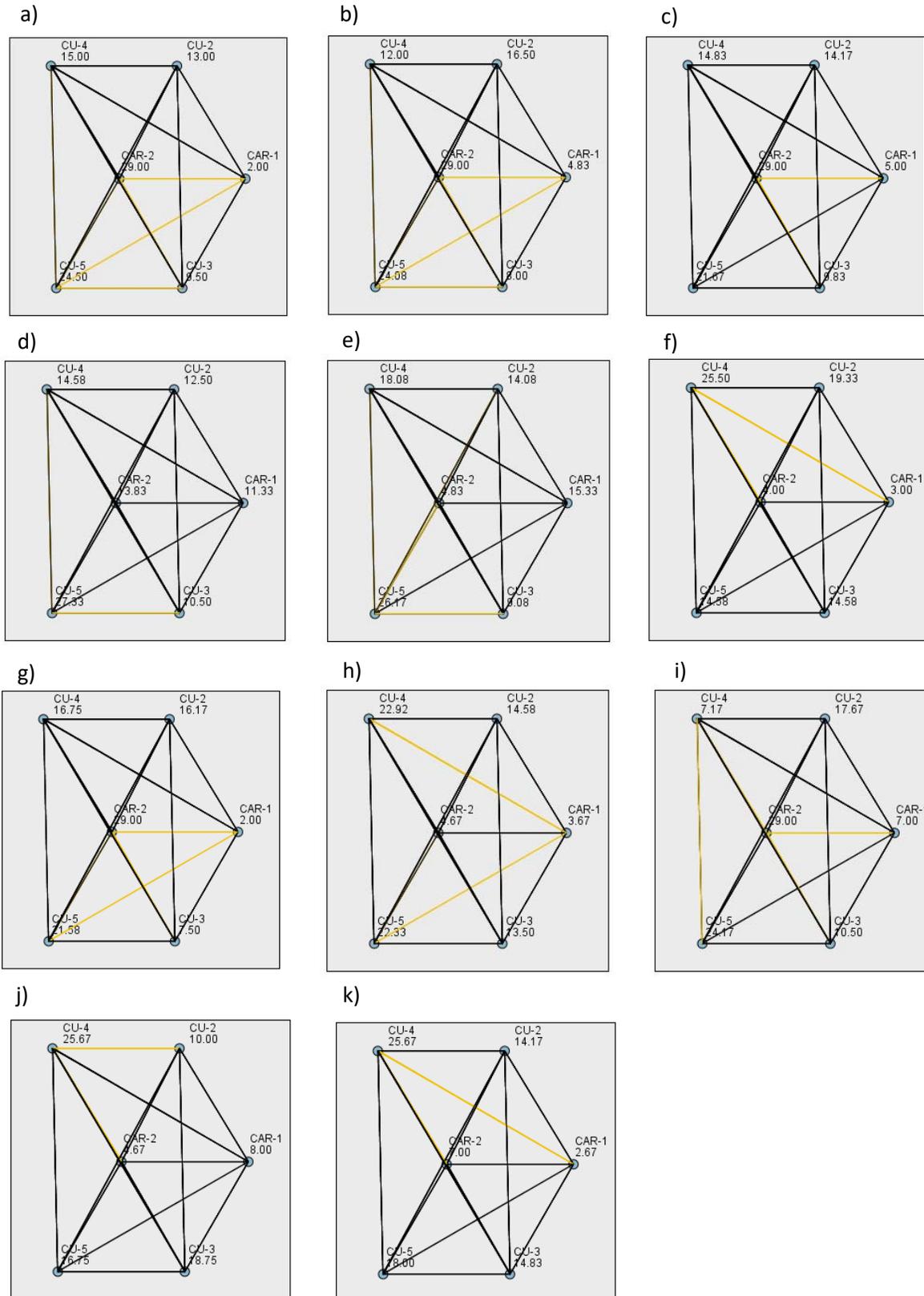


c)



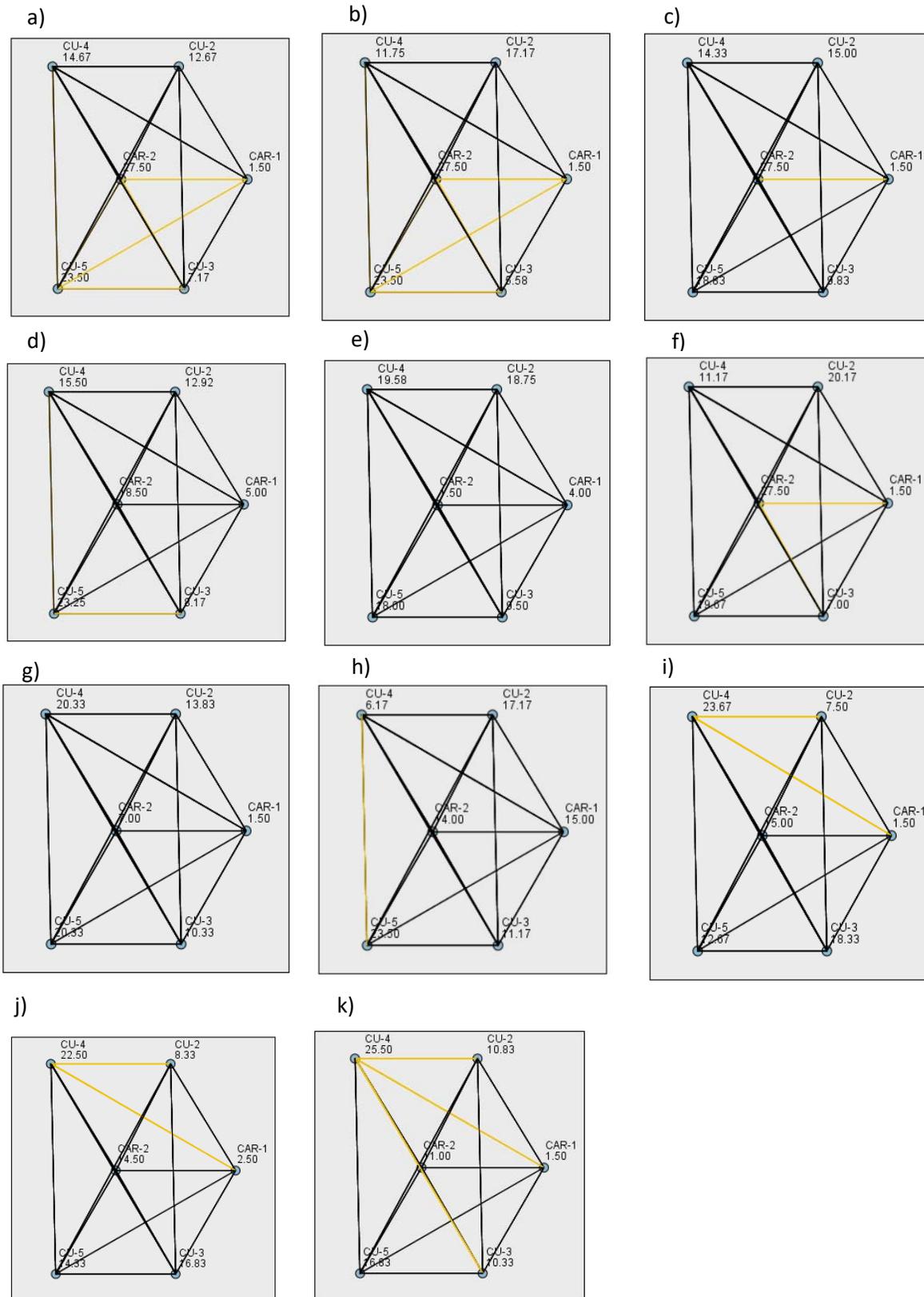
Nota: Cada nodo muestra el rango promedio de muestra por sitio y la línea amarilla la diferencia significativa entre pares.  
a) Alcalinidad, b) Nitratos y c) Sulfatos.

Anexo VI. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca La Mina en secas



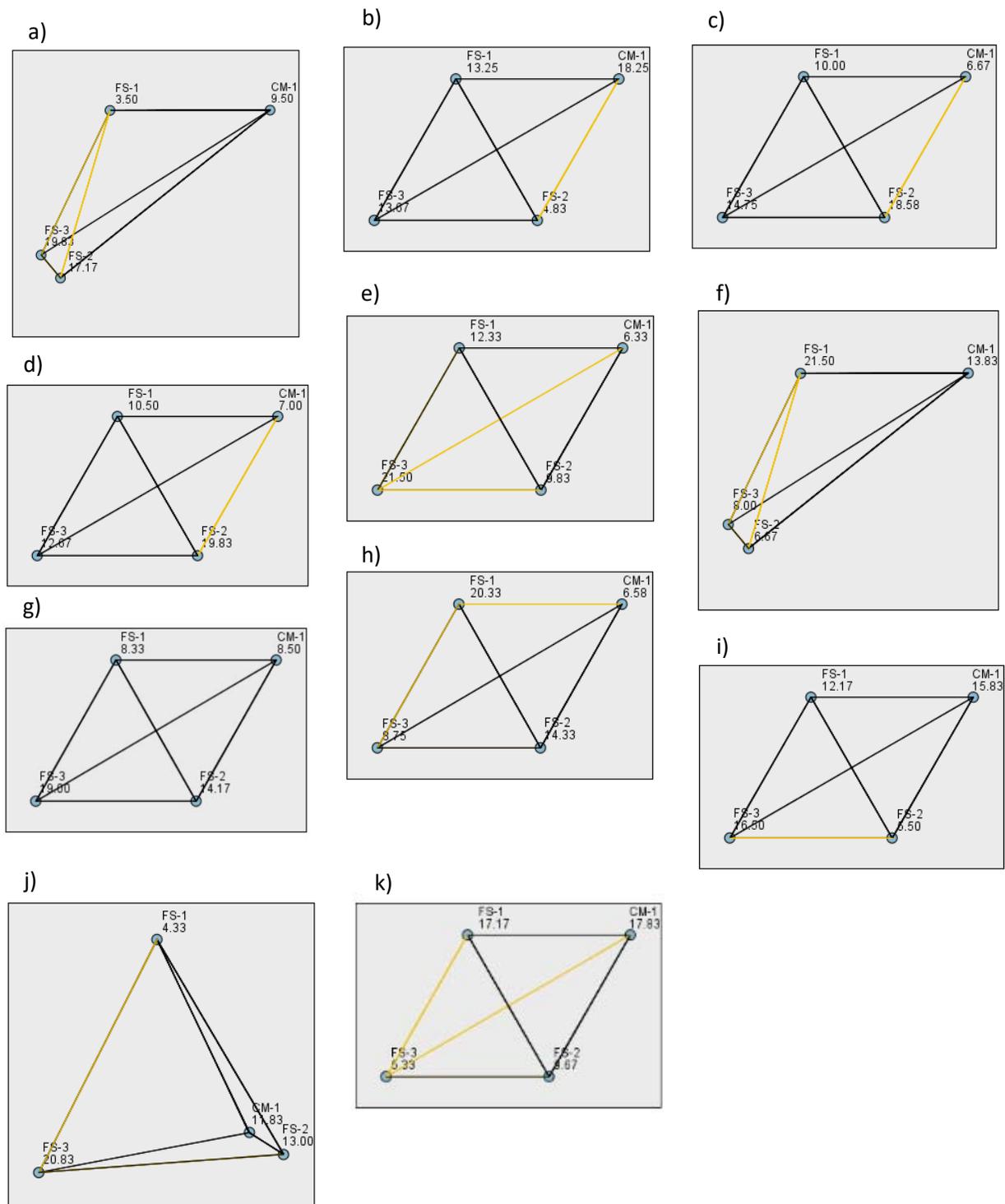
Nota: Cada nodo muestra el rango promedio de muestra por sitio y la línea amarilla la diferencia significativa entre pares. a) Alcalinidad, b) Dureza, c) C.E, d) E. coli, e) Col. totales, f) Nitratos, g) Sulfatos, h) Cloruros, i) Calcio, j) Sodio y k) Magnesio.

Anexo VII. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca La Mina en llluvias



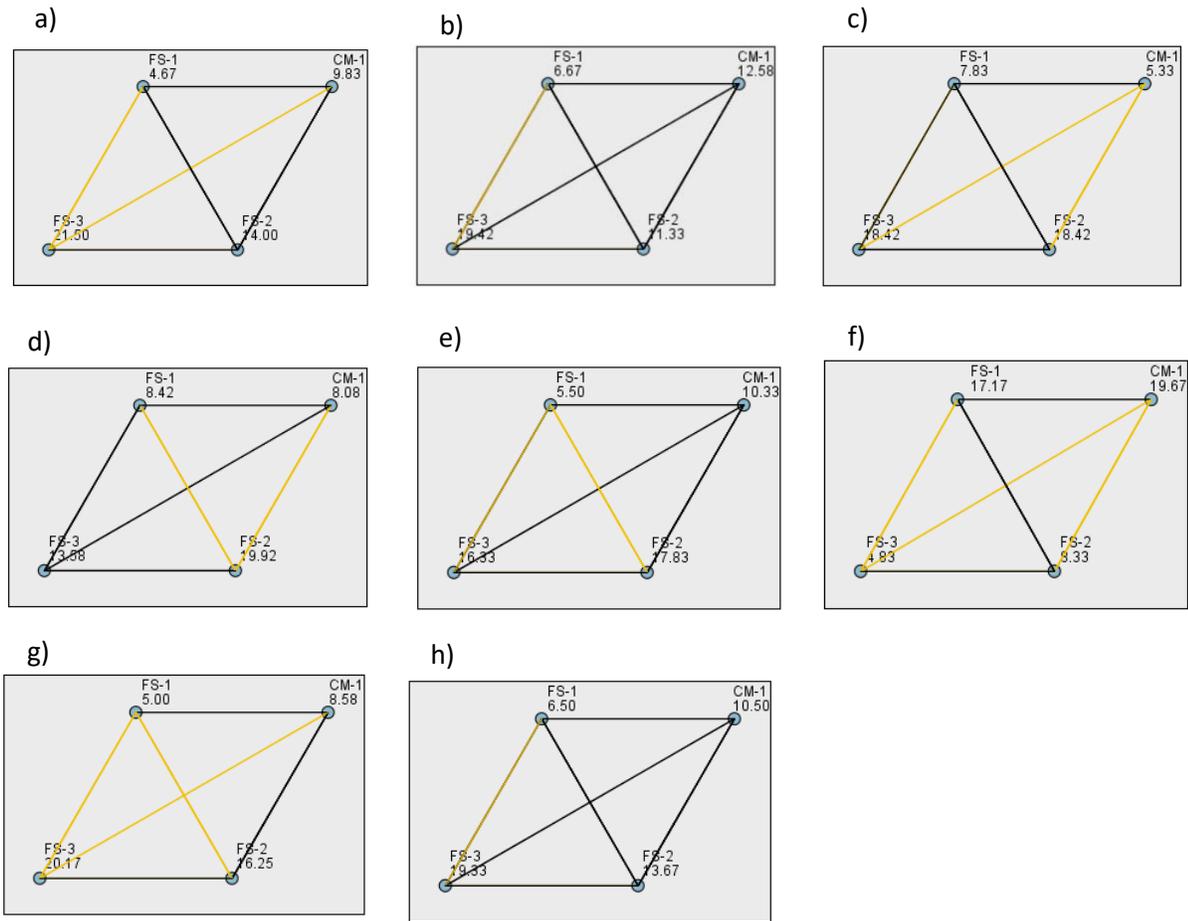
Nota: Cada nodo muestra el rango promedio de muestra por sitio y la línea amarilla la diferencia significativa entre pares. a) Alcalinidad, b) Dureza, c) C.E, d) E. coli, e) Nitratos, f) Sulfatos, g) Cloruros, h) Calcio, i) Sodio, j) Potasio y k) Magnesio.

Anexo VIII. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Remunrrejé en secas



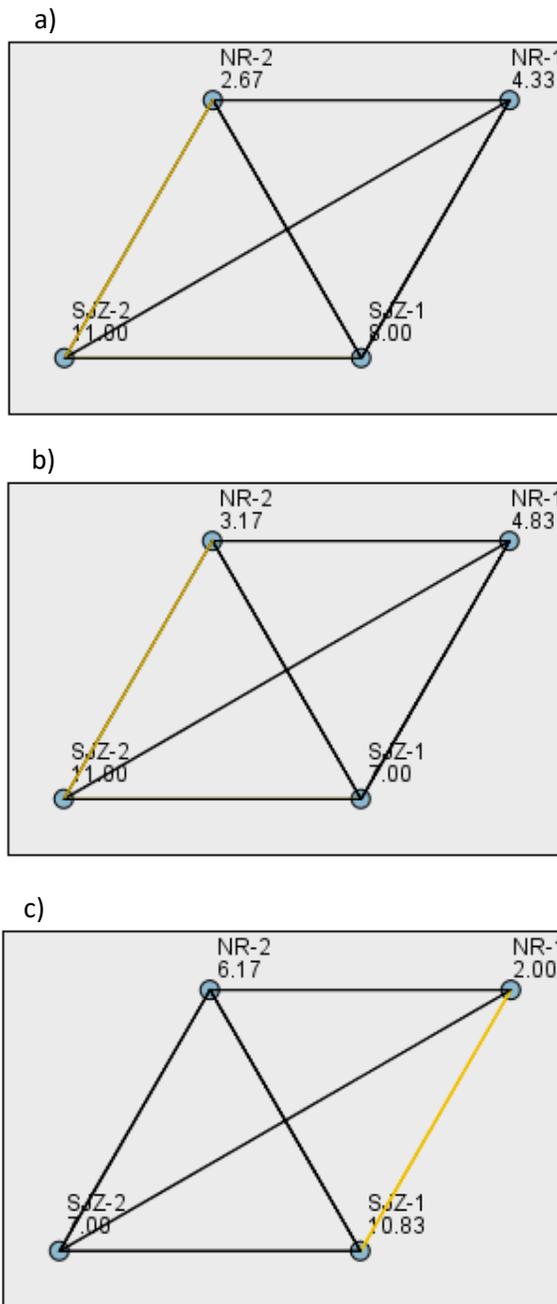
Nota: Cada nodo muestra el rango promedio de muestra por sitio y la línea amarilla la diferencia significativa entre pares. a) Alcalinidad, b) Dureza, c) E. coli, d) Col. Totales, e) Nitratos, f) Sulfatos, g) Cloruros, h) Fluoruro, i) Calcio, j) Potasio y k) Magnesio.

Anexo IX. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Remunrrejé en lluvias



Nota: Cada nodo muestra el rango promedio de muestra por sitio y la línea amarilla la diferencia significativa entre pares. a) Alcalinidad, b) Dureza, c) E. coli, d) Col. Totales, e) Nitratos, f) Sulfatos, g) Cloruros y h) Potasio.

Anexo X. Comparaciones por parejas de sitio en la microcuenca Zitácuaro en secas



Nota: Cada nodo muestra el rango promedio de muestra por sitio y la línea amarilla la diferencia significativa entre pares.  
a) Alcalinidad, b) Nitratos y c) Cloruros.