



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**CALIDAD DEL AGUA EN EL EMBALSE DE UNA PRESA EN
GUERRERO A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN
GEOESPACIAL**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. LILIA OCHOA ROMERO

DIRECTOR DE TESINA: **M.I. RODRIGO TAKASHI SEPULVEDA HIROSE**

CIUDAD DE MÉXICO

MAYO 2017

Dedicatorias

A mis papás, Sergio y Lilia por ser el pilar de mi educación, tanto académica como de la vida, por su incondicional cariño, apoyo y motivación.

A Marifer y Gaby por sus consejos, ánimos y risas por poder contar con ustedes desde siempre.

A mis abuelitos por su compañía, ayuda y consejos a lo largo de todo este tiempo, sin ustedes el camino habría sido muy difícil.

A Martín Balcázar por motivarme a salir adelante, por su cariño y compañía. Gracias por ser uno de mis principales apoyos.

A mi profesor Rodrigo Takashi Sepúlveda por confiar en que haría un buen trabajo, por todas sus enseñanzas y siempre tener la disposición de ayudarme, gracias por el entusiasmo con el que realiza su trabajo.

A mis compañeros de la especialidad, gracias por su amistad y por contribuir en mi formación profesional.

A la Universidad y al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería por todo.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	6
2	OBJETIVOS	7
2.1	OBJETIVO GENERAL	7
2.2	OBJETIVO PARTICULAR	7
3	MARCO CONCEPTUAL	7
3.1	CALIDAD DEL AGUA	7
3.1.1	Parámetros físicos	7
3.1.2	Parámetros químicos y compuestos orgánicos	9
3.1.3	Análisis bacteriológicos	10
3.2	ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA	11
3.2.1	Estructura de cálculo	12
3.2.2	Parámetros que conforman los ICA	14
3.2.3	Asignación de pesos a cada parámetro	15
3.2.4	Clasificación de los ICA	17
3.3	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y PERCEPCIÓN REMOTA	17
3.3.1	Concepto de sistemas de información geográfica	17
3.3.2	Concepto de percepción remota	18
3.3.3	SIG y PR como tecnologías correlacionadas	19
4	DESARROLLO METODOLÓGICO	20
4.1	LOCALIZACIÓN DEL EMBALSE	20
4.2	DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA, LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS DE LA CUENCA	20
4.2.1	Características físicas	21
4.3	DETERMINACIÓN DE SITIOS DE MUESTREO EN EL EMBALSE	39
4.3.1	Descripción de cada sitio de muestreo	40
4.3.2	Tipo de muestras	41
4.4	RESULTADOS FÍSICOQUÍMICOS DETERMINADOS IN SITU	42
4.4.1	Medio de transporte	43
4.5	RESULTADOS DE PARÁMETROS DETERMINADOS EN LABORATORIO	43
4.5.1	Resultado de parámetros físicos	44
4.5.2	Resultado de parámetros químicos	45
4.5.3	Resultado de parámetros microbiológicos	49
4.6	CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA	49
4.6.1	Cálculo del índice de Calidad del Agua (ICA)	50
4.6.2	Cálculo del ICA IMTA-II UNAM	53
4.6.3	Cálculo del UWQI	57
4.7	VISUALIZACIÓN E INTEGRACIÓN DE LA INFORMACIÓN GEOESPACIAL	60
4.7.1	Determinación de unidades físico-ambientales	60
4.7.2	Clasificación no supervisada	64
4.7.3	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	66
5	INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	69

5.1	INTERPRETACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA	69
5.1.1	<i>Índice de Calidad del Agua (ICA)</i>	69
5.1.2	<i>ICA IMTA-II UNAM</i>	71
5.1.3	<i>UWQI</i>	73
5.2	INTEGRACIÓN DE MAPAS	74
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
7	BIBLIOGRAFÍA.....	79

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1.	Diagrama de los elementos del proceso de percepción remota o teledetección.....	19
Imagen 2.	Localización de la zona de estudio	20
Imagen 3.	Ubicación de la Región Hidrológica Balsas en la República Mexicana	22
Imagen 4.	Delimitación de la RH Balsas en los estados de la República Mexicana.	23
Imagen 5.	Subregiones hidrológicas que conforman la RH Balsas.	24
Imagen 6.	Elevaciones de la Región Hidrográfica Balsas.....	25
Imagen 7.	Tipos de suelos presentes en la Región Hidrológica Balsas.	26
Imagen 8.	Usos de suelo en la Región hidrológica Balsas	28
Imagen 9.	Tipos de climas presentes en la Región Hidrológica Balsas	29
Imagen 10.	Precipitación media anual en la Región Hidrológica Balsas	30
Imagen 11.	Principales ríos de la Región Hidrológica Balsas.....	34
Imagen 12.	Puntos de muestreo	40
Imagen 13.	Usos de suelo y vegetación en el embalse.....	61
Imagen 14.	Edafología en el embalse.....	62
Imagen 15.	Unidades físico-ambientales	63
Imagen 16.	Composición 753 (Natural con remoción atmosférica), creada a partir de los archivos recortados	65
Imagen 17.	Resultado del análisis CLUSTER	66
Imagen 18.	NDVI en la zona de estudio	68
Imagen 19.	Reclasificación del NDVI.....	69
Imagen 20.	Unidades físico-ambientales y variación de la calidad del agua en el embalse.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los índices de calidad del agua	11
Tabla 2. Ecuaciones de cálculo empleadas para la determinación de un ICA... ..	12
Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleados por diferentes ICA.....	14
Tabla 4. Pesos relativos asignados a los parámetros que conforman los ICA	16
Tabla 5. Clasificación de los ICA	17
Tabla 6. Recursos utilizados en la elaboración de mapas.....	20
Tabla 7. Número de municipios y superficie por entidad federativa y subregión hidrológica en la Región Hidrográfica Balsas.....	23
Tabla 8. Subregiones y cuencas hidrológicas que integran la RH Balsas.....	31
Tabla 9. Usos del agua en la Región Hidrológica Balsas.....	35
Tabla 10. Principales presas de la Región Hidrológica Balsas.	37
Tabla 11. Centrales hidroeléctricas de la CFE en la Región Hidrológica Balsas.....	37
Tabla 12. Geolocalización de los puntos de muestreo	40
Tabla 13. Puntos de muestreo e identificación de muestras.....	41
Tabla 14. Parámetros fisicoquímicos determinados in situ	42
Tabla 15. Parámetros determinados	43
Tabla 16. Índice de calidad individual para cada parámetro.....	50
Tabla 17. Pesos específicos designados para el cálculo del ICA IMTA-II UNAM	53
Tabla 18. Ecuaciones matemáticas formuladas para el UWQI	57
Tabla 19. Unidades físico-ambientales alrededor del embalse	64
Tabla 20. Reclasificación del NDVI.....	68
Tabla 21. Resultados del ICA	70
Tabla 22. Calificación del agua en función del ICA	70
Tabla 23. Clasificación del ICA IMTA-II UNAM.....	71
Tabla 24. Resultados del ICA IMTA-II UNAM	72
Tabla 25. Esquema de categorización del UWQI	73
Tabla 26. Resultados del UWQI.....	73
Tabla 27. Descripción de la calidad del agua en las clases generadas	75

1 INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental para la proliferación de la vida, además de ser un recurso que permite el desarrollo económico y social de cualquier país. Su calidad depende tanto de factores naturales como de la acción humana.

Sin la acción humana, la calidad del agua vendría determinada por la erosión del suelo, los procesos atmosféricos de evapotranspiración y sedimentación de lodos y sales, la lixiviación natural de la materia orgánica y los nutrientes del suelo por los factores hidrológicos, los procesos biológicos en el medio acuático que pueden alterar la composición física y química del agua. (Decenio Internacional para la Acción "El agua fuente de vida" 2005-2015)

Para entender esta problemática, primero se realizó un estudio de la calidad del agua en una zona determinada del embalse de la presa Ing. Carlos Ramírez Ulloa.

Se parte de la toma de muestras para la obtención de una serie de parámetros e indicadores. Con los resultados de estos datos se realiza un cálculo para que posteriormente se conviertan en un valor numérico, llamado índice de calidad del agua, que permite obtener una calificación que determina el estado general de las aguas en función de unos rangos de calidades establecidos y realizan una clasificación con base en los usos que se le podrían dar al recurso.

Posteriormente con ayuda de un software de Sistemas de Información Geográfica y el uso de Percepción Remota se realizó una categorización de zonas, llamadas unidades ambientales, que permitió conocer la influencia que tiene el uso de suelo y la edafología en el agua del embalse con el propósito de comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas.

Todo esto se logró con el uso de herramientas que permitieron realizar intersección de capas vectoriales para una integración de datos y así por medio de la creación de mapas, tener una mejor representación visual de la información, además de desarrollar una clasificación no supervisada para conocer la distribución de las distintas clases que presenta el agua en su calidad.

Otro instrumento útil para comprender cómo afecta el uso de suelo en la vulnerabilidad del recurso es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos se busca la generación de información útil para la administración y explotación adecuada de los recursos existentes en la zona.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- Determinar la calidad del agua en el embalse de la presa Ing. Carlos Ramírez Ulloa y establecer la influencia de las unidades físico-ambientales que rodean el embalse.

2.2 Objetivo particular

- Elaborar un modelo de los usos de suelo asociados al embalse mediante la interpretación de capas de información e imágenes satelitales que cubra el área de estudio.
- Evaluar la calidad del agua del embalse, mediante parámetros físicos, químicos, microbiológicos y el cálculo de los índices de calidad del agua.

3 MARCO CONCEPTUAL

3.1 Calidad del agua

El término *calidad del agua* es usado para describir la condición de este recurso, incluyendo sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito.

Estudiar la calidad que presentan los cuerpos de agua es de suma importancia, ya que permite obtener información útil en la administración y explotación de los mismos (Vázquez A., Sepúlveda R. y Fuentes V., 2015).

Los parámetros más empleados que permiten conocer este aspecto son:

3.1.1 Parámetros físicos

La medición de los parámetros físicos de calidad del agua en muchos casos es relativamente fácil, algunas de estas características pueden percibirse a través de los sentidos.

Para ejemplificar lo descrito anteriormente, se presentan algunos parámetros físicos de calidad del agua (Vázquez A., Sepúlveda R. y Fuentes V., 2015).

Color- El color del agua puede deberse al contenido natural de metales o iones metálicos en disolución, humus, residuos orgánicos, plancton o desechos industriales.

Al color que se produce en el agua debido a materia suspendida y disuelta se le conoce como *color aparente* y el que permanece una vez que se ha eliminado la materia suspendida se llama *color verdadero*.

La unidad de color está determinada por unidades de color en la escala Platino-Cobalto (UC Pt-Co), determinándose por comparación visual de la muestra de soluciones coloridas de concentraciones conocidas o con discos de vidrio de colores previamente calibrados.

Potencial de hidrógeno (pH)-. El pH indica la concentración de iones de Hidrógeno [H^+] en una disolución acuosa. La escala de pH puede tomar valores de 0 a 14, el pH=7 corresponde a una disolución neutra, un pH menor a 7 indica que se trata de una disolución ácida, mientras que un pH superior a 7 indica que se trata de una solución alcalina. La actividad biológica se restringe a valores de pH entre 6 y 8.

Para conocer este valor se puede utilizar papel tornasol, tiras de pH o por medio de una sonda.

Conductividad-. Es la capacidad del agua para permitir el paso de la electricidad. Depende de la concentración de sustancias en solución. Debido a que en el agua el valor de la conductividad es pequeño, se expresa en $\mu\text{mhos/cm}$ o en $\mu\text{siemens/cm}$.

Turbiedad-. Es la expresión de la propiedad óptica de una muestra de agua que provoca que al pasar a través de ella los rayos de luz sean dispersados y absorbidos, en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra.

Actualmente, la unidad utilizada es la UTN, unidad de turbiedad nefelométrica.

Puede determinarse en campo empleando el disco de Secchi.

Los sólidos incluyen toda la materia, excepto el agua contenida en los materiales líquidos. Es necesario medir la cantidad del material sólido contenido en agua potable, agua residual y lodos producidos en los procesos de tratamiento, de acuerdo con Metcalf y Eddy (1996), se realiza la siguiente clasificación:

Sólidos totales: se define como sólidos la materia que permanece como residuo después de evaporación y secado a 103 °C. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto. Para su determinación, la muestra, se evapora en una cápsula previamente pesada, sobre un baño de María, y luego se seca a 103-105 °C. El incremento de peso, sobre el peso inicial, representa el contenido de sólidos totales.

Sólidos disueltos: es toda la materia que se encuentra disuelta en la muestra, son determinados directamente o por diferencia entre los sólidos totales y los sólidos suspendidos. Si la determinación es directa, se filtra la muestra a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol Gooch; el filtrado se evapora en una cápsula de peso conocido sobre un baño de María y el residuo de la

evaporación se seca a 103-105 °C. El incremento de peso sobre el de la cápsula vacía representa los sólidos disueltos.

Sólidos suspendidos: es el material no disuelto, son determinados por filtración a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol Gooch previamente pesado; el crisol con su contenido se seca a 103-105 °C; el incremento de peso sobre el peso inicial, representa el contenido de sólidos suspendidos.

Sólidos volátiles y sólidos fijos: esta determinación se realiza con el fin de obtener una medida de la cantidad de materia orgánica y mineral presente. El procedimiento estándar es el de someter las cápsulas, con el residuo retenido después de completar el ensayo para sólidos totales, o el crisol, después de completar el ensayo para sólidos suspendidos, a calcinamiento en una mufla, a una temperatura de 550 °C, durante 15 a 20 minutos. La pérdida de peso se registra como mg/L de sólidos volátiles y el residuo como mg/L de sólidos fijos.

Sólidos sedimentables: se refiere a los sólidos en suspensión que se sedimentarán, bajo condiciones tranquilas, por acción de la gravedad. La determinación se hace llenando un cono Imhoff de 1 litro de volumen y registrando el volumen de material sedimentado en el cono, al cabo de una hora, en mL/L.

3.1.2 Parámetros químicos y compuestos orgánicos

Estos parámetros están relacionados con la capacidad del agua para disolver diversas sustancias, que pueden ser de origen natural o por contaminación y los efectos de estas sustancias dependerán de su concentración en el agua.

A continuación se presentan algunos de los más importantes en la determinación de la calidad del agua:

Alcalinidad- Es la capacidad para reaccionar con iones hidrógeno $[H^+]$. Es causada principalmente por los carbonatos $[CO_{3-2}]$, bicarbonatos $[HCO_{3-}]$ e hidróxidos $[OH^-]$ presentes en solución; también contribuyen los boratos, fosfatos y silicatos (Vázquez A., Sepúlveda R. y Fuentes V., 2015).

Cloruros- Dado que algunas actividades humanas generan residuos con grandes concentraciones de cloruro, su presencia en el agua es un buen indicador de afectación antrópica, además de que se encuentran contenidos en las heces y orina. Proporcionan al agua un sabor salobre.

Fosfatos- El fósforo es un nutriente esencial para los organismos vivos, su determinación es importante debido a la influencia que tiene en el proceso de eutroficación. Pueden provenir de distintas fuentes: detergentes, algunos procesos industriales, fertilizantes, escurrimientos superficiales y agua de uso de retorno agrícola.

Se encuentra principalmente en dos formas: ortofosfatos y polifosfatos.

Demanda bioquímica de oxígeno-. Es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias. Generalmente se determina la DBO_{5-20} (Vázquez A., Sepúlveda R. y Fuentes V., 2015).

Nitrógeno-. Las reacciones biológicas solo pueden ocurrir en presencia de suficiente nitrógeno.

En los ambientes acuáticos el nitrógeno puede presentarse en varias formas: nitrato, nitrito, amoniacado, amonio, óxido nitroso, nitrógeno molecular, nitrógeno orgánico disuelto (Vázquez A., Sepúlveda R. y Fuentes V., 2015).

Oxígeno disuelto-. El oxígeno es esencial para mantener las formas superiores de vida biológica, desafortunadamente es poco soluble en el agua y aunque las aguas superficiales limpias están saturadas de oxígeno, la demanda de este elemento por los desechos orgánicos puede consumirlo rápidamente. El OD depende de varios factores: temperatura, altitud, movimiento del cuerpo receptor, etc (Vázquez A., Sepúlveda R. y Fuentes V., 2015).

Las **grasas y aceites** son compuestos orgánicos constituidos, principalmente, por ácidos grasos de origen animal y vegetal y por derivados del petróleo.

3.1.3 Análisis bacteriológicos

Los análisis bacteriológicos del agua son de gran importancia para la prevención de epidemias como resultado de la contaminación del agua.

Los coliformes no solamente provienen de la materia fecal humana, sino también de animales de sangre caliente, de sangre fría y en el suelo. El grupo coliforme incluye las bacterias de forma bacilar, aerobias y facultativas.

Su presencia en el agua es considerada como un índice de contaminación fecal y por tanto de contaminación con organismos patógenos.

Coliformes totales y fecales-. Los coliformes son un grupo de bacterias consideradas un indicador de contaminación bacteriana en el agua, ya que se encuentran principalmente en el intestino de los humanos y de los animales de sangre caliente, permanecen en el agua por más tiempo que las bacterias patógenas y se comportan de manera similar a ellas en los sistemas de desinfección (Vázquez A., Sepúlveda R. y Fuentes V., 2015).

3.2 Índices de calidad del agua

La valoración de la calidad del agua puede ser entendida como la evaluación de su naturaleza química, física y biológica en relación con la calidad natural, los efectos humanos y usos posibles (Prat, 1998).

Para simplificar la interpretación de datos, existen índices de calidad de agua (ICA), los cuales reducen una gran cantidad de parámetros a una expresión simple de fácil interpretación entre técnicos, administradores ambientales y el público en general. La principal diferencia entre unos y otros está en la forma de evaluar los procesos de contaminación y el número de variables tenidas en cuenta en la formulación del índice respectivo (Fernández y Solano, 2008).

Un ICA es un número único que expresa la calidad del recurso hídrico mediante la integración de las mediciones de determinados parámetros de calidad del agua y su uso es cada vez más popular para identificar las tendencias integradas a los cambios en la calidad del agua (Samboni, Carvajal y Escobar, 2007).

Los índices de calidad del agua no sustituyen la necesidad de efectuar un análisis e interpretación exhaustiva de la información que se obtiene en los estudios de calidad del agua.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los índices de calidad del agua

Ventajas	Limitaciones
Permiten mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua.	No proporcionan información completa sobre la calidad del agua.
Método simple, conciso y válido para expresar la importancia de los datos generados regularmente en el laboratorio.	
Útiles en la evaluación de la calidad del agua para usos generales. Permiten a los usuarios una fácil interpretación de los datos.	No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua.
Pueden identificar tendencias de la calidad del agua y áreas problemáticas.	Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación.
Mejoran la comunicación con el público y aumentan su conciencia sobre las condiciones de calidad del agua.	No son de aplicación universal debido a las diferentes condiciones ambientales que presentan las cuencas de una región a otra.
Ayudan en la definición de prioridades con fines de gestión.	

Fuente: Índices de calidad del agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica (Torres, Cruz, & Patiño, 2009).

3.2.1 Estructura de cálculo

La estructura de cálculo de la mayoría de los ICA se basa en la normalización de los parámetros que los conforman de acuerdo con sus concentraciones, para su posterior ponderación en función de su importancia en la percepción general de la calidad agua; se calcula mediante la integración de las ponderaciones de los parámetros a través de diferentes funciones matemáticas.

Básicamente existen dos enfoques para calcular un ICA:

1. **El producto ponderado**-. En este método los pesos dan importancia a los puntajes y todos son ponderados de acuerdo a la importancia de los pesos y luego multiplicados, evitando el encubrimiento que se presenta cuando se calcula un valor satisfactorio, aunque el subíndice sea insatisfactorio.
2. **La suma ponderada**-. en la cual cada puntaje es multiplicado por su peso y los productos son sumados para obtener el índice si los pesos son iguales para cada puntaje. El valor del índice es llamado valor aritmético no ponderado, si la suma de los pesos no es igual, se conoce como valor aritmético de la calidad del agua. (Ball y Church, 1980)

En la tabla 2, se muestra las ecuaciones de cálculo de los ICA, asociados por grupos de acuerdo con el tipo de ecuación utilizada.

Tabla 2. Ecuaciones de cálculo empleadas para la determinación de un ICA

Grupo	Índice	Ecuación	Observaciones
1	ICA NSF (EUA) ICA Dinius (EUA) IQA CETESB (Brasil) ICA IMTA-II UNAM (México) ICA Rojas (Colombia)	$ICA_m = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i}$	Promedio geométrico ponderado: W_i : peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro i : subíndice de i-ésimo parámetro
2	CCME-WQI (Canadá) DWQI (EUA)	$ICA = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right)$	El índice incorpora tres elementos: Alcance (F1) : porcentaje de parámetros que exceden la norma. Frecuencia (F2) : porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma. Amplitud (F3) : magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple

Grupo	Índice	Ecuación	Observaciones
3	ICA Global (México)	$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n W_i I_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$	<p>I_i: Índice de calidad para el parámetro i</p> <p>W_i: Valor de la importancia relativa del parámetro i</p> <p>N: número total de parámetros</p>
4	UWQI (Europa)	$UWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i$	<p>Promedio aritmético ponderado:</p> <p>W_i: peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro</p> <p>I_i: subíndice de i-ésimo parámetro</p>
5	ISQA (España)	$ISQA = T(DQO + SS + OD + C)$	<p>T: Temperatura</p> <p>DQO: Demanda Química de Oxígeno</p> <p>OD: Oxígeno Disuelto</p> <p>C: Conductividad</p> <p>SS: Sólidos suspendidos</p> <p>A partir de 2003 el ISQA se empezó a calcular reemplazando la DQO por el carbono orgánico total (COT en mg/l)</p>
6	IAP (Brasil)	$IAP = ISTO * IQA_{CETESB}$ $ISTO = ST * SO$ $ST = \min - 1(q_1, q_2, \dots, q_n) * \min - 2(q_1, q_2, \dots, q_n)$ $SO = \text{Media aritmética}(q_a, q_b, \dots, q_n)$	<p>Dónde:</p> <p>IQA: Índice de Calidad del Agua adaptado del ICA NSF para las condiciones de Brasil.</p> <p>ISTO: Índice de Sustancias Tóxicas y Organolépticas.</p> <p>ST: Ponderación de los dos subíndices mínimos más críticos del grupo de sustancias tóxicas.</p> <p>SO: Ponderación obtenida a través de la media aritmética de los subíndices del grupo de sustancias organolépticas.</p>

Fuente: Modificado de Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica (Torres, Cruz, & Patiño, 2009).

3.2.2 Parámetros que conforman los ICA

Los parámetros utilizados para el cálculo de los índices son delimitados por profesionales especialistas, agencias o entidades gubernamentales; que son los que determinan en el ámbito legislativo la importancia al establecerlos como estándares de calidad del agua. En la tabla 3 se muestran los parámetros empleados en los ICA presentados.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleados por diferentes ICA

País	Estados Unidos		UNEP-GEMS		Unión europea	España	Brasil		México		Colombia
	ICA NSF 1970	ICA Dinius 1987	DWQI		UWQI 2007	ISQA 1982	IAP		IMTA-II UNAM 1987	ICA Global	ICA Rojas 1991
Parámetro			HWQ 2007	AWQ 2007			IQA 1975	ISTO 2002			
Alcalinidad		x							x	x	
Aluminio disuelto							x				
Amoniaco				x					x	x	
Arsénico			x		x						
Boro			x								
Cadmio			x		x		x				
Cianuro					x						
Cloruros		x		x					x	x	
Cobre			x								
Cobre disuelto							x				
Coliformes fecales	x	x					x		x	x	x
Coliformes totales		x			x				x	x	
Color		x								x	
Conductividad		x				x				x	
COT						x					
Cromo total			x				x				
DBO	x	x			x		x			x	x
Detergentes										x	
DQO						x			x		
Dureza		x							x	x	
Fenoles									x		
Fluoruro			x		x						
Fosfatos	x								x	x	
Fósforo total					x		x				
Grasas y aceites										x	
Hierro				x							

País	Estados Unidos		UNEP-GEMS		Unión europea	España	Brasil		México		Colombia
	ICA NSF 1970	ICA Dinius 1987	DWQI		UWQI 2007	ISQA 1982	IAP		IMTA-II UNAM 1987	ICA Global	ICA Rojas 1991
Parámetro			HWQ 2007	AWQ 2007			IQA 1975	ISTO 2002			
Hierro disuelto								X			
Manganeso			X					X			
Mercurio			X		X			X			
Níquel								X			
Nitratos	X	X	X		X				X	X	
Nitritos			X								
Nitrógeno total							X				
OD	X	X			X	X	X		X	X	X
PFTHM								X			
pH	X	X		X	X		X		X	X	X
Plomo			X					X			
Selenio					X						
Sodio				X							
Sólidos disueltos totales	X						X			X	X
Sólidos suspendidos						X			X	X	
Sulfatos				X							
Temperatura	X	X				X	X		X		
Turbiedad	X						X			X	X
Zinc				X				X			
Total de parámetros	9	12	18		12	6	20		14	18	6

Fuente: Modificado de *Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica* (Torres, Cruz, & Patiño, 2009).

3.2.3 Asignación de pesos a cada parámetro

La asignación de pesos (ponderación) de cada parámetro tiene mucho que ver con la importancia de los usos pretendidos y la incidencia de cada variable en el índice (Fernández y Solano, 2008).

La tabla 4 presenta los pesos asignados a los parámetros que conforman los ICA, de acuerdo con el grado de importancia dentro de cada uno de éstos.

Tabla 4. Pesos relativos asignados a los parámetros que conforman los ICA

País	Estados Unidos		Unión europea	México		Colombia
	ICA NSF	ICA Dinius	UWQI	IMTA-II UNAM	ICA Global	ICA Rojas
Alcalinidad		0.063		0.055	1.0	
Amoniaco				0.043	2.0	
Arsénico			0.113			
Cadmio			0.086			
Cianuro			0.086			
Cloruros		0.074		0.068	0.5	
Coliformes fecales	0.16	0.116		0.143	4.0	0.21
Coliformes totales		0.09	0.114	0.083	3.0	
Color		0.063			1.0	
Conductividad		0.079			2.0	
DBO	0.11	0.097	0.057	0.096	5.0	0.15
DQO				0.053		
Dureza		0.065		0.058	1.0	
Fenoles				0.033		
Fluoruro			0.086			
Fosfatos	0.1			0.073	2.0	
Fósforo total			0.057			
Grasas y aceites					2.0	
Mercurio			0.086			
Nitratos	0.1	0.09	0.086	0.053	2.0	
Nitrógeno total						
OD	0.17	0.109	0.114	0.103	5.0	0.25
pH	0.11	0.077	0.029	0.063	1.0	0.17
Selenio			0.086			
Sólidos disueltos totales	0.07				0.5	0.11
Sólidos suspendidos				0.033	1.0	
Sustancias activas al azul de metileno (detergentes)					3.0	
Temperatura	0.1	0.077		0.043		
Turbiedad	0.08				0.5	0.11

Fuente: Modificado de Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica (Torres, Cruz, & Patiño, 2009).

Los ICA mostrados en la tabla son lo que emplean asignación de pesos (W) a cada uno de los parámetros que los conforman; los restantes emplean estructuras de cálculo que no requieren dicha asignación.

3.2.4 Clasificación de los ICA

Después de realizar el cálculo del índice de calidad del agua, utilizando las ecuaciones y pesos relativos, según lo solicitado por el método, se obtiene el valor del ICA que permite clasificar el recurso. Se asigna una categoría o escala.

Este es un punto de suma importancia, ya que es aquí donde finalmente el valor obtenido es transformado en una característica que define la calidad final del agua.

A continuación se presentan los rangos de clasificación de los criterios generales de los ICA mencionados:

Tabla 5. Clasificación de los ICA

Código	ICA NSF	ICA Dinius	DWQI	UWQI	ISQA	IAP	IMTA-II UNAM	ICA Global	ICA Rojas
1	Muy mala calidad	Inaceptable su consumo	Pobre	Pobre	No puede usarse	Pésima	Inaceptable su consumo	Altamente contaminado	Muy mala
2	Mala calidad	Dudoso para consumo	Marginal	Marginal	Recreación y refrigeración	Mala	Dudoso para consumo	Contaminado	Inadecuada
3	Mediana calidad	Tratamiento de potabilización necesario	Regular	Regular	Consumo humano con tratamiento especial, Riego, Industrial	Regular	Tratamiento de potabilización necesario	Poco contaminado	Aceptable
4	Buena calidad	Dudoso consumo sin tratamiento	Buena	Buena	Consumo humano con tratamientos convencionales	Buena	Dudoso consumo sin tratamiento	Aceptable	Buena
5	Excelente calidad	Tratamiento menor	Excelente	Excelente	Excelente	Óptima	Tratamiento menor	No contaminado	Óptima
6	-	No requiere tratamiento para consumo	-	-	-	-	No requiere tratamiento para consumo		

Fuente: Modificado de *Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica* (Torres, Cruz, & Patiño, 2009).

3.3 Sistemas de información geográfica y percepción remota

3.3.1 Concepto de sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica hacen referencia a tres conceptos:

- Como disciplina-. Un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y representar datos geo-referenciados, con el objetivo de resolver

problemas de gestión y planificación (Centro Nacional de Información Geográfica y Análisis de Estados Unidos de Norteamérica).

- Como software-. Un SIG es un programa de computadora, con sus funciones propias que permiten manipular conjuntamente cartografía y bases de datos para hacer análisis y generar nueva cartografía. Algunos software existentes son: QGIS, IDRISI, ARCGIS, entre otros.
- Como proyecto-. Un SIG es la aplicación de la herramienta

En los SIG la representación y modelación del espacio puede hacerse utilizando dos tipos de formatos: el raster y el vectorial.

El **modelo raster** establece las diferencias en las entidades en función de las propiedades, para después proceder a la localización de los elementos. La entidad se divide en elementos discretos (celdas o píxeles) que tienen un único valor respecto al atributo correspondiente.

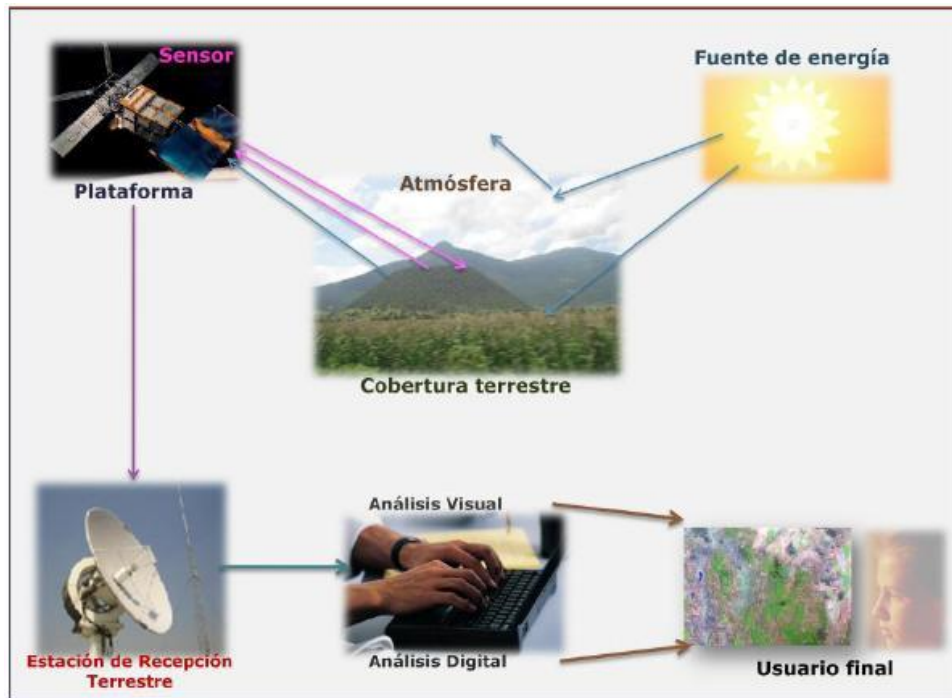
El **modelo de datos vectorial** tiende a la representación de la entidad lo más fielmente posible y utiliza tres tipos de objetos espaciales (puntos, líneas y polígonos).

La decisión entre emplear un modelo u otro debe establecerse a partir del tipo de estudio o enfoque que se quiera hacer, pero también del software y fuentes de datos disponibles.

3.3.2 Concepto de percepción remota

La percepción remota (PR) es la técnica que permite obtener información, mediante sensores instalados en las plataformas espaciales, de los objetos situados sobre la superficie terrestre. El proceso para la obtención de información a distancia de los objetos se debe a la radiación electromagnética que el sensor obtiene las características del objeto remoto. El flujo de información en un sistema de percepción remota, se presenta a continuación:

Imagen 1. Diagrama de los elementos del proceso de percepción remota o teledetección



Fuente: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/lmgSatelite/Elementos.aspx>

3.3.3 SIG y PR como tecnologías correlacionadas

La PR y SIG surgen en principio como tecnologías independientes. En los años sesenta, surge el primer Sistema de Información Geográfica en Canadá (CSIG), desarrollado por Roger Tomlinson cuyo objetivo fue el almacenamiento y procesamiento de fotografía aérea.

En los años setenta, se difunden las primeras imágenes de los satélites Landsat y se concibe la idea de integrar información cartográfica con imágenes de satélite.

Fue hasta en los años 80 que se empieza a considerar a la percepción remota como una fuente de información para un SIG, especialmente útil para su actualización.

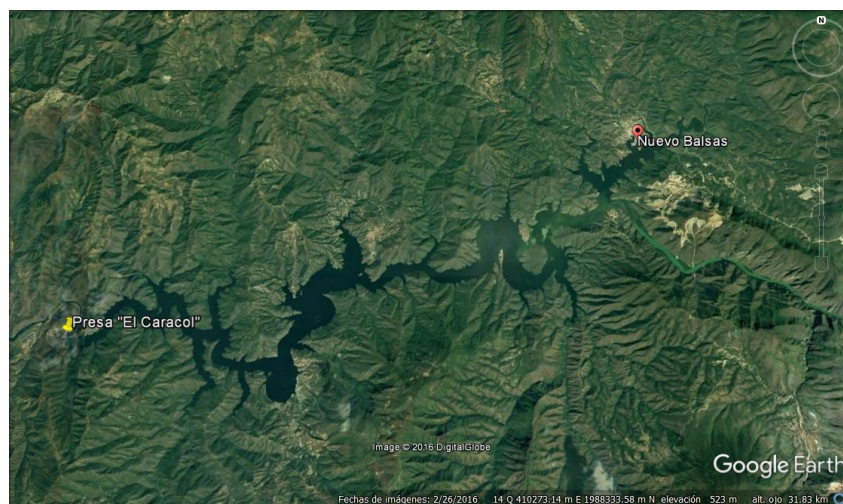
Actualmente son herramientas que trabajan conjuntamente, mientras los SIG son idóneos para el almacenamiento y gestión medioambiental, la PR brinda al sistema una de las fuentes de información más precisas. Esta convergencia se ha visto favorecida por su desarrollo en el mismo tipo de entornos de trabajo y por similares requerimientos en cuanto a hardware y software; ambas tratando con información espacial geo-referenciada de la que se pretende extraer conclusiones relevantes desde un punto de vista medioambiental o de planificación.

4 DESARROLLO METODOLÓGICO

4.1 Localización del embalse

El embalse de la presa Ing. Carlos Ramírez Ulloa, coloquialmente llamada “El Caracol”, se encuentra localizado en el cauce del Río Balsas. Particularmente se estudiarán las características de la zona cercana a la comunidad de Nuevo, Balsas, Guerrero.

Imagen 2. Localización de la zona de estudio



4.2 Descripción de la cuenca. Localización y características geográficas de la cuenca

Con el propósito de proporcionar un panorama general de la cuenca del Río Balsas, en este capítulo se realiza una descripción de sus principales características físicas. Con el uso del programa QGIS, se generaron modelos vectoriales para tener una mejor visualización de estas.

Las capas vectoriales de información fueron obtenidas a partir del portal geográfico de la CONABIO, con proyección sistema de coordenadas geográficas, datum WGS 84.

Tabla 6. Recursos utilizados en la elaboración de mapas

Capa de información	Descripción
División política estatal	Escala: 1: 250000
	Fecha de publicación: 19-04-2016
Áreas geoestadísticas municipales	Escala: 1: 250000
	Fecha de publicación: 19-04-2016
Subregiones hidrológicas	Escala: 1: 250000
	Fecha de publicación: 27-05-2009

Capa de información	Descripción
Regiones Hidrológicas	<i>Escala: 1: 250000</i>
	<i>Fecha de publicación: 27-05-2009</i>
Curvas de nivel para la República Mexicana	<i>Escala: 1: 250000</i>
	<i>Fecha de publicación: 06-03-2008</i>
Conjunto de datos vectoriales edafológicos	<i>Escala: 1: 250000</i>
	<i>Fecha de publicación: 17-01-2014</i>
Uso del suelo y vegetación	<i>Escala: 1: 250000</i>
	<i>Fecha de publicación: 07-05-2009</i>
Climas	<i>Escala: 1: 1000000</i>
	<i>Fecha de publicación: 09-01-2008</i>
Precipitación media anual	<i>Escala: 1: 4000000</i>
	<i>Fecha de publicación: 11-03-2008</i>
Hidrografía	<i>Escala: 1: 4000000</i>
	<i>Fecha de publicación: 14-03-2008</i>

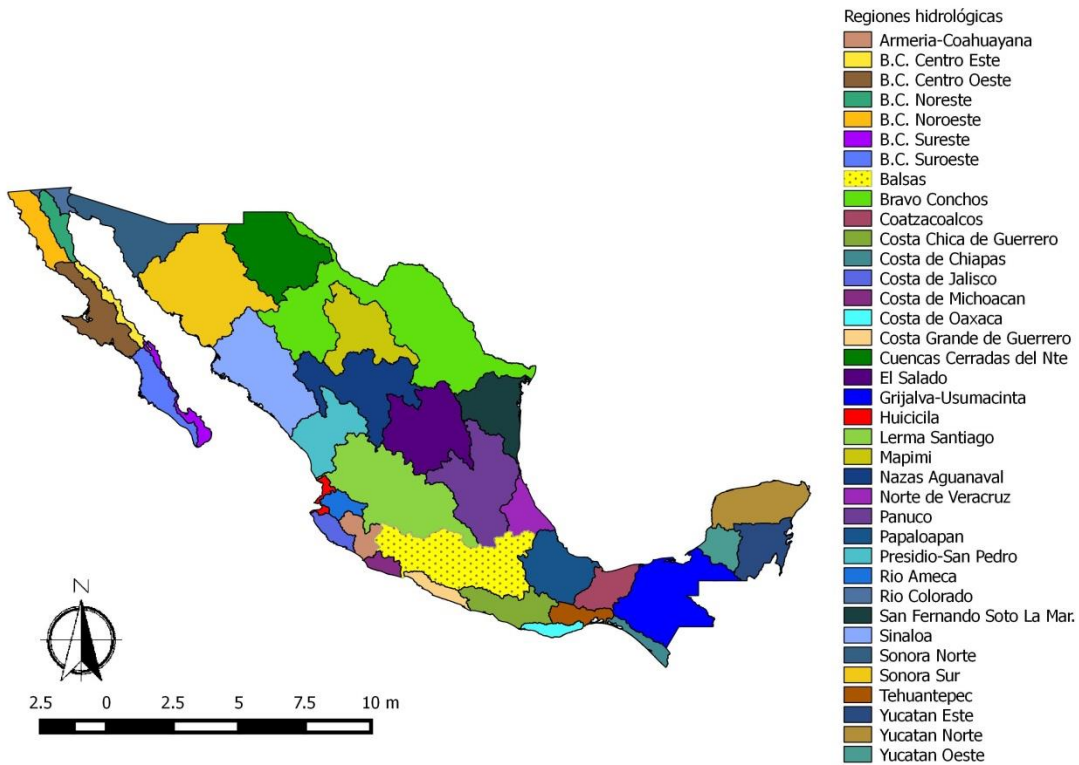
4.2.1 Características físicas

4.2.1.1 Ubicación y delimitación geográfica

La cuenca del Río Balsas corresponde a la Región Hidrológica número 18 Balsas (RH Balsas), la cual se localiza al suroeste de nuestro país entre los paralelos 17°13' y 20°04' de latitud norte y los meridianos 97°25' y 103°20' de longitud oeste. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Limita al norte con las regiones hidrológicas Lerma-Santiago, Río Pánuco y Norte de Veracruz; al oeste con las regiones hidrológicas Armería-Coahuayana y Costa de Michoacán; al sur con el océano Pacífico y con las regiones hidrológicas Costa Grande de Guerrero y Costa Chica de Guerrero; y al este con la región hidrológica Papaloapan. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012)

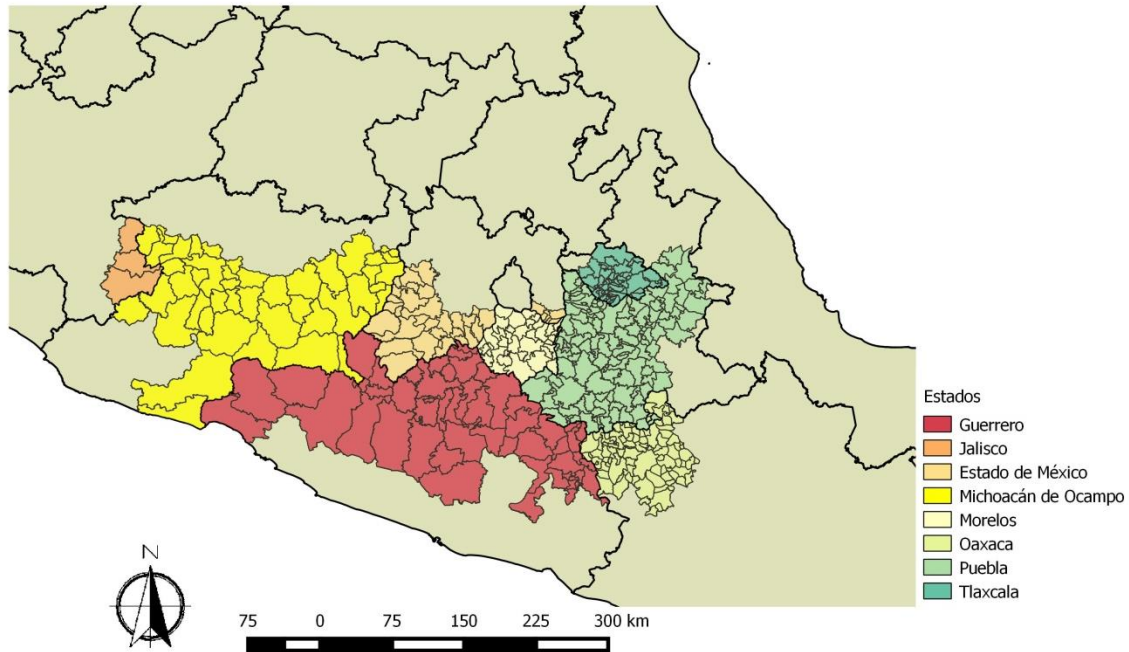
Imagen 3. Ubicación de la Región Hidrológica Balsas en la República Mexicana



Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

Desde el punto de vista administrativo, la cuenca del río Balsas pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas (RHA IV), la cual está integrada por el territorio de 420 municipios completos de ocho estados: incluye todos los municipios del estado de Morelos (33) y parte de los municipios de los estados de Tlaxcala (56 de 60), Puebla (127 de 217), México (33 de 125), Oaxaca (78 de 570), Guerrero (45 de 81), Michoacán (45 de 113) y Jalisco (3 de 125). Su superficie administrativa abarca 116,439 km². (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012)

Imagen 4. Delimitación de la RH Balsas en los estados de la República Mexicana.



Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

La distribución de los municipios y superficies estatales correspondientes a cada una de ellas se presenta en la tabla 7.

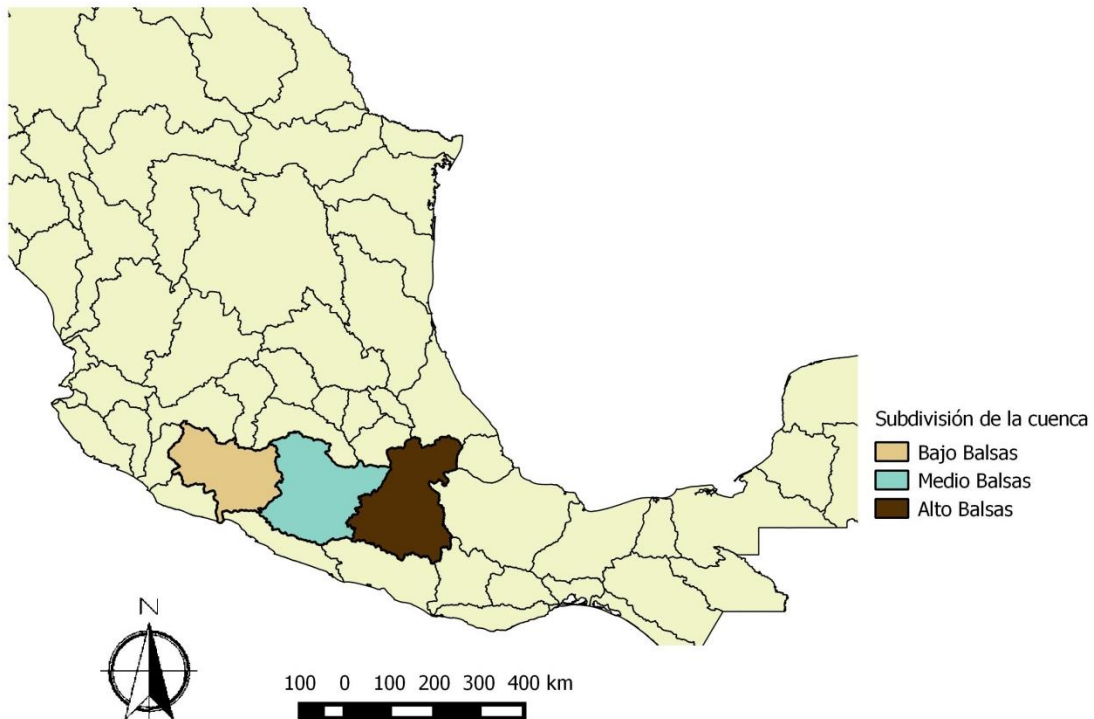
Tabla 7. Número de municipios y superficie por entidad federativa y subregión hidrológica en la Región Hidrográfica Balsas

Entidad federativa	Alto Balsas		Medio Balsas		Bajo Balsas		Total	
	Número de municipios	Superficie (km ²)	Número de municipios	Superficie (km ²)	Número de municipios	Superficie (km ²)	Número de municipios	Superficie (km ²)
Guerrero	23	11263	18	14219	4	9930	45	35412
Jalisco					3	2925	3	2925
México	16	2547	17	6193			33	8740
Michoacán			13	6768	32	25604	45	32372
Morelos	33	4882					33	4882
Oaxaca	78	8430					78	8430
Puebla	127	20160					127	20160
Tlaxcala	56	3514					56	3514
Total	333	50796	48	27180	39	38459	420	116435

Fuente: Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Río Balsas

Con fines de planeación y gestión de los recursos hídricos, la Región Hidrológica Balsas se ha dividido en tres subregiones hidrológicas: Alto Balsas, Medio Balsas y Bajo Balsas, como se muestra en la imagen 5.

Imagen 5. Subregiones hidrológicas que conforman la RH Balsas.



Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportail del Sistema de Información sobre Biodiversidad

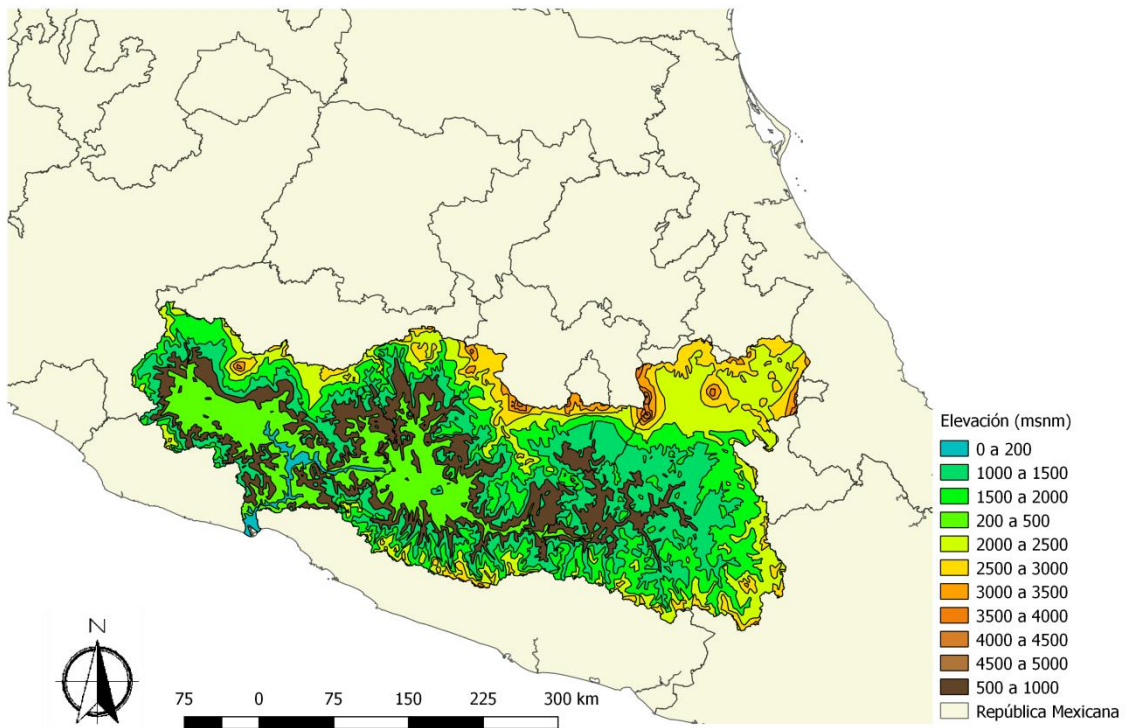
4.2.1.2 Fisiografía

La Región Hidrológica Balsas está limitada al norte por el Eje Neovolcánico Transversal; al poniente y sur por la Sierra Madre del Sur y la Sierra de Juárez; y al oriente por la Sierra Madre de Oaxaca.

Tiene la forma de una depresión alargada con valles muy angostos, cuyo territorio está formado en su mayor parte por elevaciones con fuertes pendientes y un arreglo geológico poco propicio para el control y almacenamiento de los grandes escurrimientos que se presentan en la región hidrológica (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

La evolución de las dos grandes provincias fisiográficas que delimitan la depresión del río Balsas (Eje Neovolcánico Transversal y Sierra Madre del Sur) dieron lugar a la amplia variedad de características fisiográficas, geológicas, topográficas y climáticas que hoy día integran la cuenca. Se cree que esta depresión fue originada por grandes movimientos tectónicos de placas, que formaron el canal del Balsas, cuya cuenca se extiende en la parte central, a una altura promedio de 1,500 msnm (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Imagen 6. Elevaciones de la Región Hidrográfica Balsas.

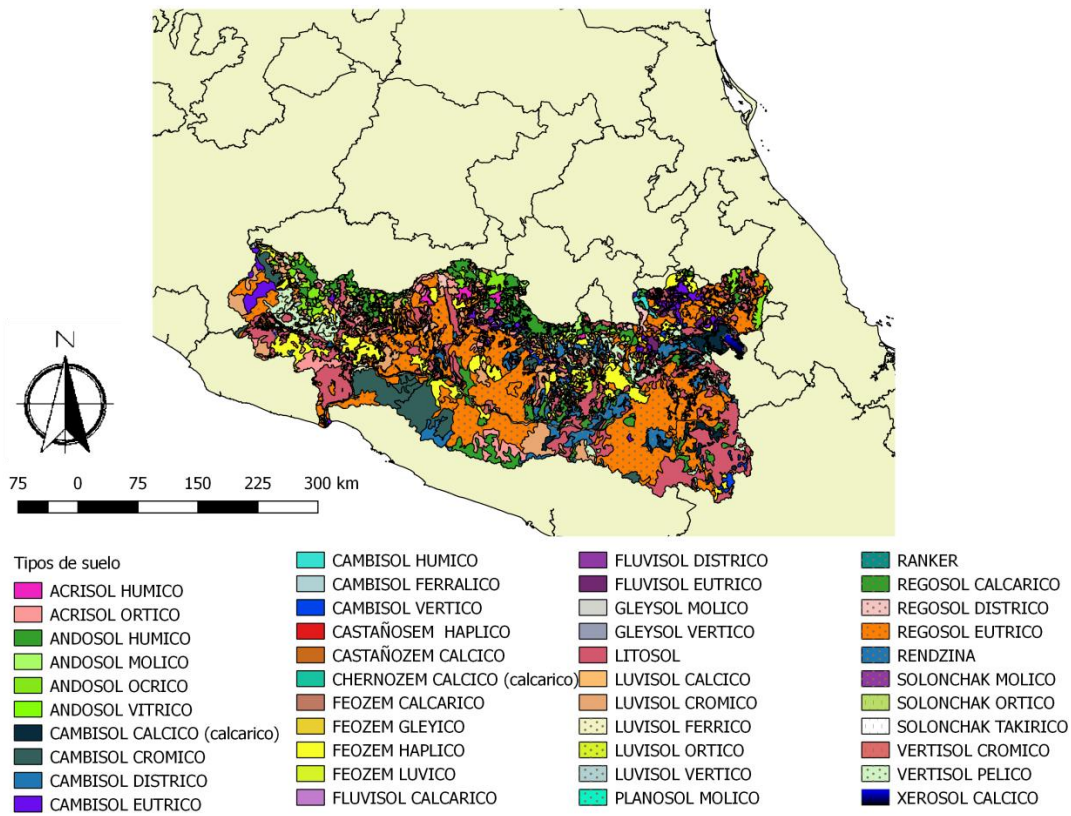


Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

4.2.1.3 Tipos de suelo

Dentro de la Región Hidrológica Balsas se pueden identificar 17 tipos de familias de suelos predominantes como se muestra en el siguiente mapa (imagen 7).

Imagen 7. Tipos de suelos presentes en la Región Hidrológica Balsas.



Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportel del Sistema de Información sobre Biodiversidad

A continuación se describen brevemente los principales tipos de suelo en la región:

Los suelos de tipo **Litosol** (del griego lithos: piedra) se caracterizan por ser muy someros (menos de 10 cm de profundidad), limitados por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido; son particularmente comunes en regiones montañosas, por lo que son un recurso potencial para el pastoreo en zonas húmedas y para el desarrollo forestal. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión son muy variables dependiendo de otros factores ambientales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

De manera análoga, los suelos de tipo **Regosol** (del griego reghos: manto, cobija o capa de material suelto que cubre a la roca) son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados, y son particularmente comunes en zonas áridas (incluyendo el trópico seco) y en regiones montañosas; cuando se ubican en zonas con 500-1,000 mm de lluvia anuales necesitan riego para una producción satisfactoria de cultivos; la baja capacidad de retención de humedad de estos suelos obliga a aplicaciones frecuentes de agua de riego, por

lo que el riego por goteo resuelve el problema (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Finalmente, los suelos de tipo **Feozem** (del griego phaios-oscuro y del ruso zemlja-tierra), se caracterizan por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes; son de profundidad muy variable; cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con rendimientos altos. Los Feozems menos profundos, situados en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con más facilidad, sin embargo, pueden utilizarse para el pastoreo o la ganadería con resultados aceptables (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

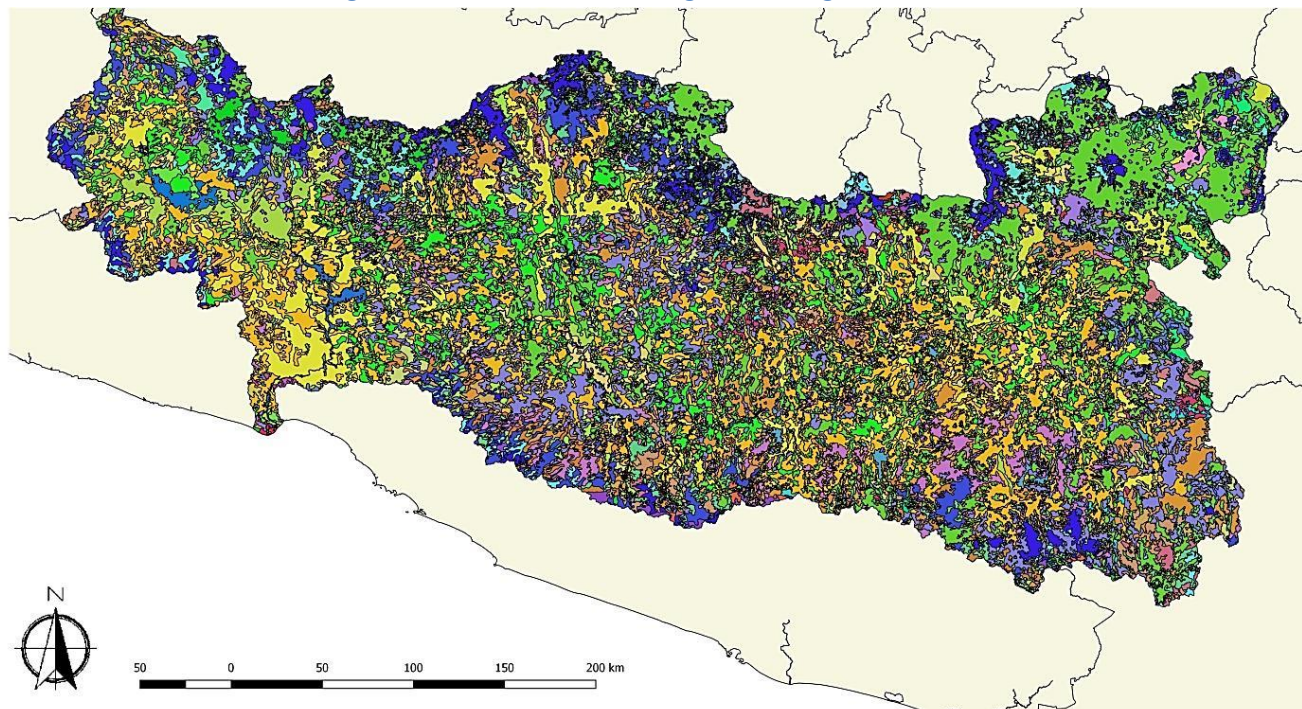
4.2.1.4 Usos del suelo y vegetación

Según el programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía del Consejo de Cuenca Río Balsas establece que la mayor parte del uso del suelo en la Región Hidrológica Balsas está destinado a la cubierta vegetal, la cual se integra principalmente por bosques (27.59%), selvas (23.07%) y pastizales (15.17%), que en conjunto ocupan el 65.83% del territorio. La vegetación del área montañosa de la cuenca del Río Balsas constituye una de las más ricas reservas de bosques (de pino-encino, principalmente) y selvas tropicales subhúmedas de México. Su función en el mantenimiento de los servicios ecológicos de los ecosistemas de la cuenca es irremplazable.

En los últimos años ha existido una profunda transformación en el manto vegetal del área: los bosques y las selvas han sufrido procesos acelerados de destrucción por actividades humanas ligadas a los aprovechamientos forestales irracionales, los incendios inducidos, los cambios de uso en favor de actividades agrícolas y ganaderas de baja productividad e, incluso, la siembra de estupefacientes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Por otra parte, el 26.29% de la cuenca (30,844.33 km²) es utilizado para fines agrícolas; desafortunadamente, el 79% de esta área no está bajo riego, el 2% se riega eventualmente y sólo el 19% es de riego (5,753.29 km²), que equivale apenas al 4.9% de la superficie total de la cuenca. (INEGI, Carta de Uso del Suelo y Vegetación 1:250,000). Las condiciones del relieve en la Región Hidrológica Balsas y los tipos de suelos limitan el uso que se puede hacer de los mismos, por lo cual, cuando se utilizan zonas que naturalmente no son adecuadas para uso agrícola, se propician alteraciones que han provocado erosión en grandes zonas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Imagen 8. Usos de suelo en la Región hidrológica Balsas



Usos de suelo

- AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL
- AGRICULTURA DE HUMEDAD ANUAL Y SEMIPERMANENTE
- AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL
- AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE
- AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE
- AGRICULTURA DE RIEGO PLANTACION AGRICOLA PERMANENTE
- AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE
- AGRICULTURA DE RIEGO SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE
- AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL
- AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE
- AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y SEMIPERMANENTE
- AGRICULTURA DE TEMPORAL PLANTACION AGRICOLA PERMANENTE
- AGRICULTURA DE TEMPORAL SEMIPERMANENTE Y PERMANENTE
- ASENTAMIENTOS HUMANOS
- BOSQUE CULTIVADO PLANTACION FORESTAL PERMANENTE
- BOSQUE DE ENCINO
- BOSQUE DE ENCINO-PINO
- BOSQUE DE GALERÍA
- BOSQUE DE OYAMEL
- BOSQUE DE PINO

- BOSQUE DE PINO-ENCINO
- BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA
- CHAPARRAL
- CUERPO DE AGUA
- DESPROVISTO DE VEGETACIÓN
- MANGLAR
- MATORRAL CRASICAULE
- PALMAR INDUCIDO
- PASTIZAL CULTIVADO PERMANENTE
- PASTIZAL INDUCIDO
- PRADERA DE ALTA MONTAÑA
- SABANOIDE
- SELVA BAJA CADUCIFOLIA
- SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA
- SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA
- TULAR
- VEGETACIÓN DE GALERÍA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE GALERÍA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE OYAMEL
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO

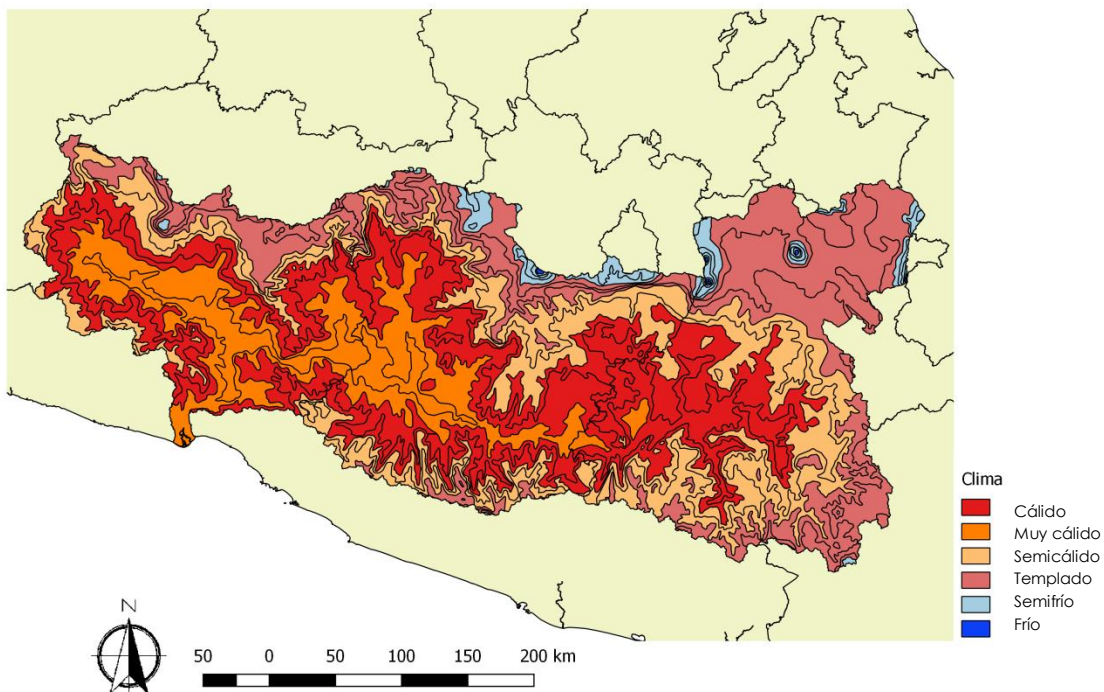
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE TÁSCATE
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE OYAMEL
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE CHAPARRAL
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO
- VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE ENCINO-PINO
- VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE BOSQUE DE TÁSCATE
- VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA CADUCIFOLIA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA BAJA ESPINOSA CADUCIFOLIA
- VEGETACIÓN SECUNDARIA HERBÁCEA DE SELVA MEDIANA SUBCADUCIFOLIA
- ZONA URBANA

Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

4.2.1.5 Climatología

En la Región hidrológica Balsas se presenta en mayor medida un clima macrotérmico, cálido característico de la zona intertropical, se tienen lluvias en la época de sol alto, similar al clima de la sabana. También, en las zonas más bajas de altitud, a la salida del escurrimiento de agua de la cuenca hidrológica el clima es predominantemente seco, semidesértico o estepario, al igual que al sureste de la región hidrológica. Al norte de la región y sobre todo en las zonas altas de la cuenca el clima característico es templado subhúmedo con la presencia de las cuatro estaciones térmicas: primavera, verano, otoño e invierno. Finalmente en las zonas montañosas de gran altitud el clima es semifrío subhúmedo y en regiones como los volcanes Popocatepetl, Iztaccihuatl y La Malinche se tiene un clima frío (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012)

Imagen 9. Tipos de climas presentes en la Región Hidrológica Balsas

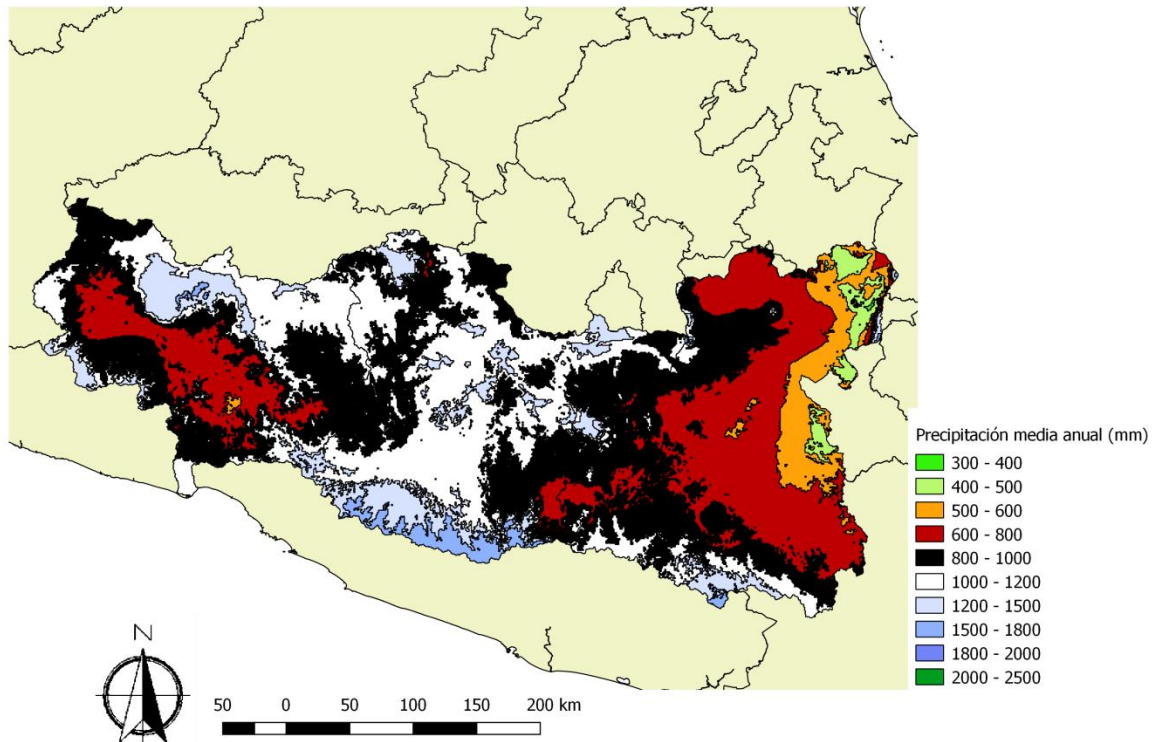


Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

En la imagen 10 se puede notar las grandes zonas de lluvias de 600 mm que se presentan en la región mixteca de los estados de Oaxaca y Puebla; en la cuenca hidrológica del río Libres Oriental en Tlaxcala; y en la cuenca del río Tepalcatepec en Michoacán. Este comportamiento de la precipitación, se debe en parte a la presencia de las formaciones montañosas que la delimitan (Sierra Madre del Sur,

Sierra de Juárez y Sierra Madre de Oaxaca), ya que éstas restringen el paso del aire húmedo proveniente, tanto del océano Pacífico, como del Golfo de México, lo que ocasiona que se presenten zonas de escasa precipitación.

Imagen 10. Precipitación media anual en la Región Hidrológica Balsas



Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

4.2.1.6 Hidrología superficial

El río Balsas constituye la cuenca hidrológica más importante de la vertiente del Pacífico mexicano. Como se mencionó al inicio del capítulo, esta cuenca se divide en tres subregiones hidrológicas: Alto Balsas, Medio Balsas y Bajo Balsas, las cuales están conformadas a su vez por 15 cuencas hidrológicas, distribuidas tal como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Subregiones y cuencas hidrológicas que integran la RH Balsas

Subregión hidrológica	Cuenca hidrológica	Área hidrológica (km ²)	Principales corrientes	Principales presas
Alto Balsas	Río Libres Oriental	4912.63	Ríos Atoyac, Mixteco, Amacuzac, Apatalco, Tembembe, Nexapa y Tlapaneco	Valsequillo, el Muerto, el Rodeo, Peña Colorada y el Encino
	Río Alto Atoyac	4135.52		
	Río Nexapa	4214.25		
	Río Bajo Atoyac	12222.35		
	Río Mixteco	11094.64		
	Río Tlapaneco	4981.53		
	Río Amacuzac	8903.16		
	Subtotal	50464.08		
Medio Balsas	Río Medio Balsas	21268.4	Ríos Cutzamala, los Espadines, el Tajo, Grande, la Pila	El Bosque, Villa Victoria, Colorines, el Gallo, Vicente Guerrero, el Caracol, las Garzas
	Río Cutzamala	10619.14		
	Subtotal	31887.54		
Bajo Balsas	Río Tacámbaro	5495.46	Ríos Quitupan, Zicuirán, Salado, Cupatitzio, Tacámbaro y Tepalcatepec	Infiernillo, la Villita, Zicuirán, Chilatan, la Calera y los Olivos
	Río Cupatitzio	2659.03		
	Río Zirahuén	282.61		
	Ríoparacho-Nahuatzen	848.5		
	Río Tepalcatepec	11718.72		
	Río Bajo Balsas	13949.96		
	Subtotal	34954.28		
Total	117305.9			

Fuente: Programa de medidas de preventivas y mitigación de la sequía. Consejo de Cuenca Río Balsas

Con información obtenida del programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía del Consejo de Cuenca Río Balsas, se sabe que el **Alto Balsas** nace en el valle de Puebla, a muy elevada altitud, y cubre un área de cuenca de 50,464 km². Sus formadores son los ríos San Martín y Lahuapán; a estos dos ríos unidos se les conoce con el nombre de Atoyac poblano. El río Atoyac está formado por varios escurrimientos que provienen de la vertiente sur del Eje Neovolcánico Transversal y que descienden del volcán Iztaccíhuatl, desde

altitudes de 4,000 msnm, entre los estados centrales de México y Puebla. Recibe por su margen izquierda las aguas del río Mixteco y la confluencia de ambos crean el Alto Balsas (imagen 10). A partir de esta unión, el río Balsas recibe a lo largo de su recorrido los nombres de Poblano, Grande, Mezcala y Balsas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

El río Mixteco tiene sus orígenes en la vertiente occidental de la Sierra de Oaxaca, en la Mixteca, 25 km al sur-suroeste del poblado de Santa María La Asunción Tlaxiaco, Oaxaca, donde se forma con las aportaciones de los ríos Tlaxiaco y Mixtepec y más adelante con las del río Salado, considerado en esta parte como el colector general. Aguas abajo de la confluencia del Atoyac y el Mixteco, el Balsas recibe por su margen derecha las aguas del río Nexapa. Este es otro de los formadores primarios del río Balsas, que nace de los escurrimientos que descienden del volcán Popocatepetl a una altitud de 5,400 msnm. Nueve kilómetros antes de su confluencia con el río Balsas, sobre su margen izquierda, recibe las aguas del río Tlapaneco, uno de los de mayor caudal del Alto Balsas. El río Tlapaneco se origina en la unión de dos corrientes: el Coicoyán o Salado que desciende de elevaciones de 1,750 msnm de la Sierra de Coicoyán en el estado de Oaxaca y el río Atencochayota, que desciende de elevaciones de 1,600 msnm de la Sierra de Malinaltepec en el estado de Guerrero (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

El **Medio Balsas** se inicia a una altura de 500 msnm, aguas abajo de la confluencia del río Amacuzac, y cubre un área de cuenca de 31,887 km². En su tramo de recorrido, recibe las descargas del río Tepecoacuilco por su margen derecha; entre cañones, sigue su curso durante unos 20 km hasta que, por su lado derecho, confluyen las aguas del río Cocula o Iguala; después de recorrer unos 60 km, recibe por la izquierda las aguas del río Huautla o Tetela; y 60 km aguas abajo, por su margen derecha lo alimenta el río Poliuta. Varios ríos de pequeñas dimensiones incrementan su flujo por la margen izquierda: Ajuchitlán, Amuco y Cuirio, que descienden por los flancos de la Sierra Madre del Sur desde elevaciones de 3,000 a 3,500 msnm (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Unos kilómetros aguas abajo recibe por su derecha las corrientes del río Cutzamala. Este es uno de los más importantes aportadores del río Balsas en el tramo medio de su cuenca. A lo largo de sus 260 km de recorrido recibe varios nombres: Taximaroa, Turundeo, Río Grande, Tuxpan, Zitácuaro y, finalmente, Cutzamala. En su confluencia con el río Balsas, cerca de Ciudad Altamirano, en el estado de Guerrero, el río ya ha descendido hasta los 250 msnm. Hasta la estación hidrométrica La Caimanera, cubre un área de cuenca de 31,950.7 km² y recibe volúmenes medios anuales de 8,497 hm³ (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

El **Bajo Balsas** comprende el último tramo hasta la desembocadura en el océano Pacífico y cubre los últimos 34,954 km² del área de cuenca del río Balsas. Después de un recorrido de unos 40 km, y a alturas de entre 250 y 200 msnm, el Balsas recibe por su margen izquierdo las aguas del río del Oro, y por su margen derecho las de los ríos San Lucas, Huetamo y Tacámbaro.

La corriente principal formadora del río Tacámbaro se origina en las estribaciones del Eje Neovolcánico Transversal, a partir de las corrientes perennes que descienden desde alturas de 3,000 msnm, de los cerros Turicato, Taretio y El Perdido, que se sitúan a unos 40 km al suroeste de Morelia, Michoacán (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Unos kilómetros más adelante de la confluencia del río Tacámbaro, el Balsas se encañona y toma una dirección sur-norte, para luego dar un viraje hacia el oeste, lo que creó las condiciones favorables para la construcción de la presa "El Infiernillo". En este punto, a 176 msnm, que corresponde al nivel máximo de embalse del vaso de almacenamiento de la gigantesca presa, la obra hidráulica inunda un área de 400 km², almacena unos 12,000 hm³ de las aguas y retiene unos cinco millones de m³ de sedimentos del Balsas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

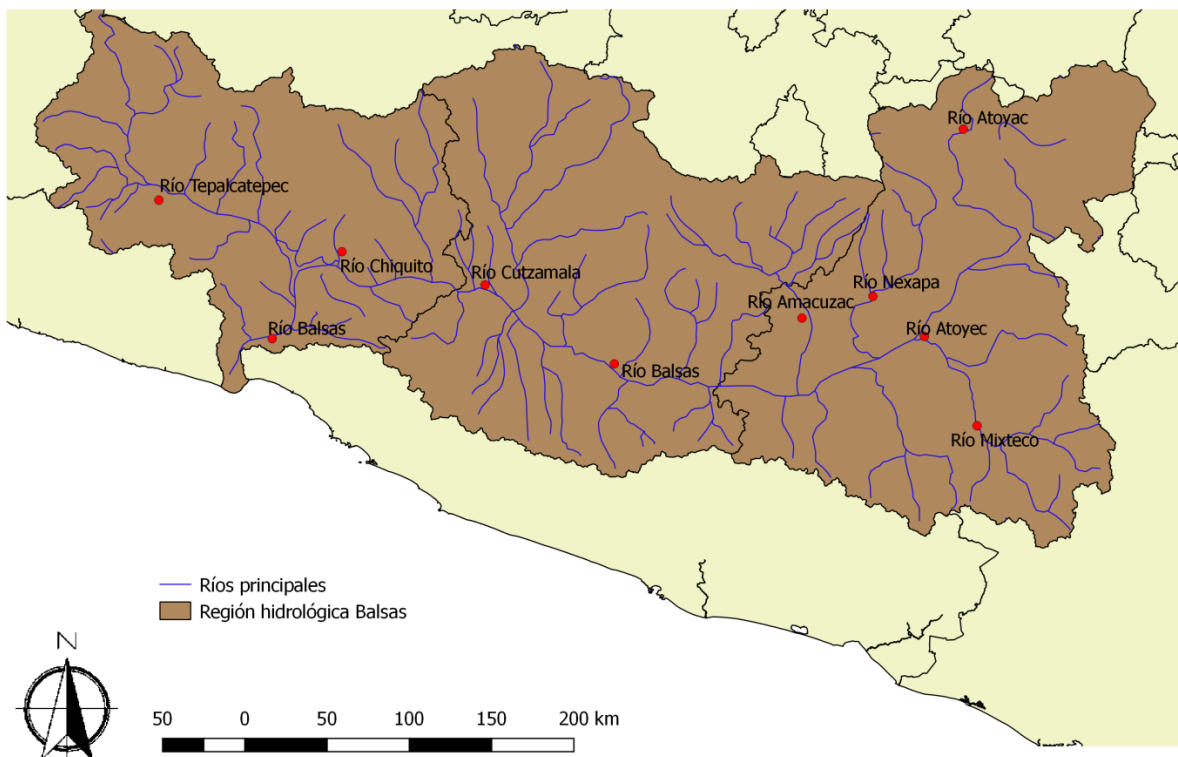
En el vaso de la presa descargan hoy varios antiguos ríos, riachuelos y arroyos como El Salitre, La Palma, La Virgen, el río San Antonio, el Pinzadarán y, especialmente, el importante río Tepalcatepec. Este último se origina en el cerro de la Tinaja y tiene como principal formador al río Quitupan que nace a 2,000 msnm a 9.5 km al sur-suroeste del poblado de Cojumatlán de Regules, Michoacán. Una vez en terreno del estado de Michoacán, el río Tepalcatepec penetra en una zona en donde efectúa una serie de inflexiones y cambia de rumbo hacia el sureste. Aguas abajo recibe por la margen derecha al río Chila y por la izquierda al río Cancita. Más abajo recibe por su margen izquierda las aportaciones del río Cupatitzio-El Marqués. Finalmente toma un rumbo hacia el sur y confluye al río Balsas por la margen derecha de éste, efectuándose dicha confluencia dentro del vaso de la presa El Infiernillo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Unos 28 km aguas abajo de la cortina de la presa El Infiernillo, el río Balsas recibe por su margen derecha al río de Las Juntas y 17 km después, se localiza el sitio donde se construyó la presa derivadora José María Morelos o La Villita. Dos kilómetros aguas abajo de la cortina, el río Balsas se bifurca dando lugar a la zona del delta.

El delta del Río Balsas comprende los últimos 13 km del sistema fluvial en su curso hacia el mar y es el área de mayor importancia como zona de deposición y

almacenamiento de los flujos de sedimentos, minerales y materia orgánica de la cuenca. Su importancia ecológica es por ello crucial. De la magnitud y de la calidad de estos depósitos depende la función ecológica del sistema fluvial como mecanismo de producción, transporte y deposición de nutrientes y minerales hacia la zona costera y el mar (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Imagen 11. Principales ríos de la Región Hidrológica Balsas



Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

4.2.1.7 Hidrología subterránea

Con respecto a las aguas subterráneas, a la Región Hidrológica Balsas le corresponden 46 unidades hidrogeológicas (acuíferos) que en total suman una superficie de 122,639 km². El acuífero Ixcaquixtla es el de mayor superficie, con alrededor de 9,560 km² (8% del total), ubicado en la subregión hidrológica Alto Balsas. Le siguen los acuíferos Huetamo y Apatzingán, el primero de ellos ubicado

sobre la franja central de la región y el segundo al occidente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

4.2.1.8 Usos del agua

En la Región Hidrológica Balsas se utiliza un total de 47,332.70 hm³ anuales, de los cuales 45,476.84 hm³ (96.1%) corresponden a aguas superficiales y 1,855.86 hm³ (3.9%) se extraen anualmente de los acuíferos (aguas subterráneas), tal como se indica en la tabla 9.

Tabla 9. Usos del agua en la Región Hidrológica Balsas

Tipo de uso	Volumen de agua (hm ³ /año)		
	Superficial	Subterráneo	Total
Agrícola	4766.6	1060	5826.6
Doméstico	5.3	4.5	9.8
Generación de energía eléctrica	36831.49	0	36831.49
Industrial	3243.98	143.14	3387.12
Múltiples	121.15	47.89	169.04
Pecuario	1.12	2.02	3.14
Público urbano	254.68	585.54	840.22
Servicios	40.61	11.79	52.4
Acuícola	211.91	0.98	212.89
Total	45476.84	1855.86	47332.7

Fuente: basado en Estudios Técnicos de la RH Balsas (DOF, 26 de enero de 2011)

Como se observa en esta tabla, el principal usuario de agua superficial en la RH Balsas es la Comisión Federal de Electricidad (CFE), que utiliza los volúmenes para la generación de energía eléctrica en las distintas centrales hidroeléctricas instaladas en las presas, y al returbinar los volúmenes en más de una central, hace uso del 80.99% del agua utilizada en la región hidrológica. No obstante que el uso es no consuntivo, por la ubicación de la presa Infiernillo en la parte baja de la región, esto hace que la mayoría de las cuencas localizadas aguas arriba, tengan porcentajes altos de su escurrimiento comprometidos para este uso. En la figura 1 se presenta la distribución porcentual por tipo de uso (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

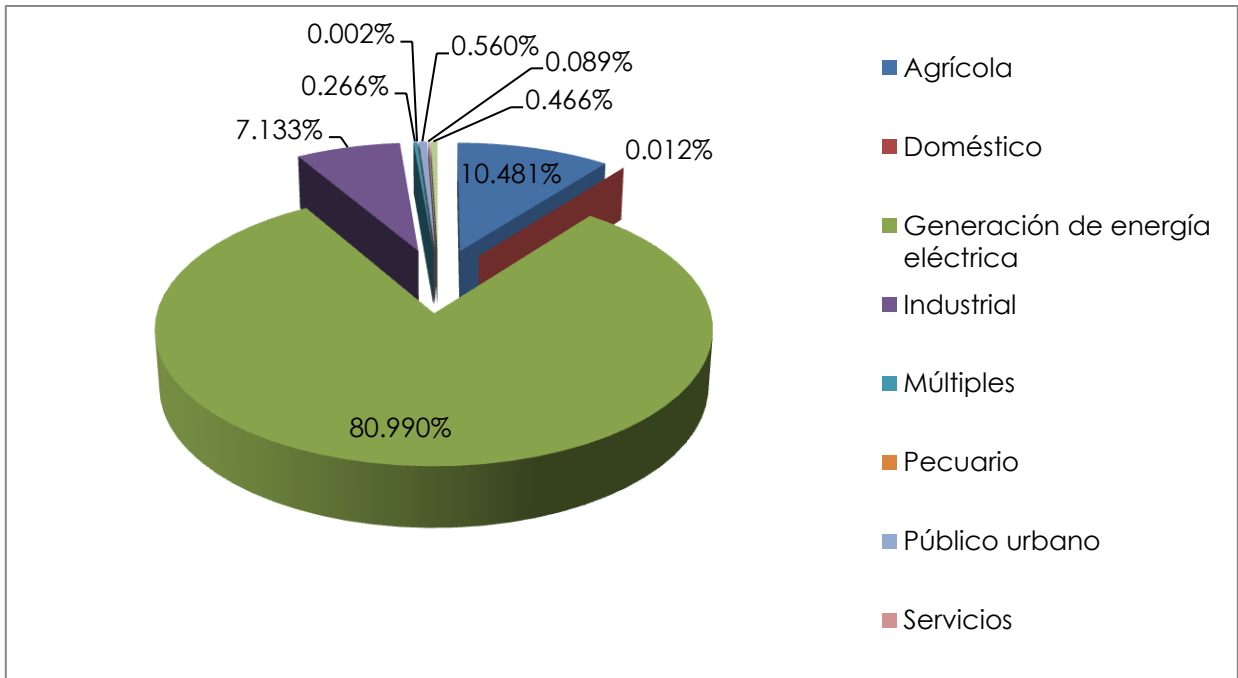


Figura 1. Distribución porcentual por uso de aguas superficiales en la Región Hidrológica Balsas
Fuente: basado en Estudios Técnicos de la RH Balsas (DOF, 26 de enero de 2011)

4.2.1.9 Infraestructura hidráulica

La Región Hidrológica Balsas cuenta con infraestructura hidráulica de gran relevancia en el contexto nacional, en especial destaca la infraestructura dedicada a la generación de energía eléctrica, misma que ocupa el 80% del volumen de agua en la cuenca. Sin embargo, el resto de los usos cuentan también con obras clave para la utilización del recurso. Es importante destacar que en esta región se ubica la segunda presa más importante de México, Infiernillo, con una capacidad de almacenamiento de 12,500 hm³ (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

a) Presas

La generación de energía eléctrica, el riego, el abastecimiento de agua potable y la protección de la población y sus bienes, son la principal utilidad que genera la existencia de este tipo de obras (tabla 10). La privilegiada ubicación geográfica del río Balsas, con respecto de los principales centros industriales y de población en el centro del país, perfiló que haya sido considerada la cuenca para la generación de energía eléctrica, para lo cual existen 18 plantas hidroeléctricas, de las cuales 13 están en operación y 5 fuera de servicio (tabla 11) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Tabla 10. Principales presas de la Región Hidrológica Balsas.

Nombre oficial	Nombre común	Ubicación	Captación útil (hm ³)	Corriente principal	Operada por	Uso	Año de terminación
Infiernillo	Infiernillo	Guerrero, Michoacán	8844.1	Río Balsas	CFE	G, C	1963
Carlos Ramírez Ulloa	El Caracol	Guerrero	834	Río Balsas	CFE	G	1986
Constitución de Apatzingán	Chilatán	Jalisco	451.2	Río Tepalcates	CONAGUA	I	1989
José Ma. Morelos	La Villita	Guerrero, Michoacán	210.8	Río Balsas	CFE	G, I	1968
El Gallo	El Gallo	Guerrero	221.4	Río Atoyac	DR 057	G	1991
Valle de Bravo	Valle de Bravo	México	418.3	Río Balsas	CONAGUA	P	1944
Manuel Ávila	Valsequillo	Puebla	281.7	Río Cutzamala	DR 030	I	1946
Vicente Guerrero	Palos Altos	Guerrero	250	Río Polutla	DR 057	I	1968
Total			11511.5				

G: Generación de energía eléctrica; C: Control de avenidas; I: Irrigación; P: Uso público urbano.

Fuente: Conagua, Estadísticas del agua en la cuenca del río Balsas, 2010.

Tabla 11. Centrales hidroeléctricas de la CFE en la Región Hidrológica Balsas.

No.	Central hidroeléctrica	Capacidad efectiva instalada (MW)	Fecha inicio operación	Presa/ Localidad	Río que aprovecha	Entidad
1	Infiernillo	1000	28/01/1965	Infiernillo	Balsas	Michoacán
2	Villita	300	01/09/1973	José Ma. Morelos	Balsas	Michoacán
3	Carlos Ramírez Ulloa	600	16/12/1986	El Caracol	Balsas	Guerrero
4	Ixtapantongo*	0	29/08/1944	Colorines	Tilostoc	México
5	Santa Bárbara*	0	19/10/1950	Ixtapantongo	Tilostoc	México
6	Tingambato*	0	24/09/1957	Los Pinzanes	Tilostoc	México
7	El Durazno*	0	01/10/1955	Valle de Bravo	Melacatepec	México

No.	Central hidroeléctrica	Capacidad efectiva instalada (MW)	Fecha inicio operación	Presa/ Localidad	Río que aprovecha	Entidad
8	Portezuelos 1	2	01/01/2001	Echeverría	Atoyac	Puebla
9	Portezuelos 2	1	01/01/2008	Echeverría	Atoyac-Nexpa	Puebla
10	Tepazolco*	0	16/04/1953	Manuel A. Camacho	Atoyac	Puebla
11	Zumpimito	6	01/10/1944	Zumpimito	Cupatitzio y Santa Bárbara	Michoacán
12	Cupatitzio	72	14/08/1962	Cupatitzio	Cupatitzio	Michoacán
13	El Cóbano	52	25/04/1955	Jicalán	Cupatitzio	Michoacán
14	San Pedro Porúas	3	01/10/1958	San Pedro Porúas	San Pedro	Michoacán
15	Bartolinas	1	20/11/1940	Salto de Caracha	Tacámbaro	Michoacán
16	Tirio	1	01/01/1905	Umécuaro	Río Grande o San Pedro Michoacán	Michoacán
17	Itzícuarro	1	01/01/1929	Itzícuarro	Itzícuarro	Michoacán
18	Tamazulapan	2	12/12/1962	Tamazulapan	Río Mixteco	Oaxaca

*Centrales hidroeléctricas fuera de servicio del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

Fuente: elaborado con base en Conagua, Estadísticas del agua en la Cuenca del Río Balsas, 2010; y Estudios técnicos de la RH Balsas (DOF, 26 de enero de 2011)

El 75% de la generación de energía eléctrica se realiza en las presas Infiernillo, Villita y Carlos Ramírez Ulloa (El Caracol), las cuales en conjunto tienen una capacidad efectiva instalada de 1,900 MW.

b) Infraestructura hidroagrícola

El área total bajo riego en la Región Hidrológica Balsas es de aproximadamente 510,300 ha, de las cuales 199,530 ha (39.1%) se distribuyen en nueve distritos de riego, y las restantes 310,770 ha (60.9%) corresponden a 4,146 pequeñas unidades de riego. Debido a la complejidad, variedad y extensión (generalmente reducida) de las unidades de riego, es poca la información actualizada y detallada que existe sobre los beneficiarios, superficies, patrones de cultivos, estadísticas de producción y volúmenes de agua utilizados en las mismas. Así, diferentes estudios realizados concluyen en la necesidad de la verificación y actualización de la información de las unidades de riego (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

Con respecto a los distritos de riego, éstos cubren una superficie física total de 235,588 ha, y regable de 84,323 ha, en los cuales se proporciona el servicio de riego a 64,758 usuarios organizados en asociaciones civiles. Los distritos se distribuyen por entidad federativa de la siguiente manera: dos en Guerrero, cuatro en Michoacán; y uno en Morelos, Puebla y Tlaxcala, respectivamente.

Para proporcionar el servicio de riego a los usuarios, los distritos de riego cuentan con una infraestructura que incluye 5021.31 km de canales, de los cuales el 55.0 están revestidos y el 45.0% sin revestir; además de 4,739.41 km de caminos y 915.6 km de drenes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2012).

4.3 Determinación de sitios de muestreo en el embalse

Un factor importante para cualquier estudio de calidad del agua es la determinación de los sitios de muestreo, generalmente se establecen de modo intuitivo en función de factores como descargas o sitios de interés (CONAGUA, 2005).

Cabe resaltar que la siguiente información fue proporcionada de la realización de un proyecto de acuicultura de Tilapia, por lo que los puntos de muestreo fueron elegidos en función de las zonas con mayor potencial de cultivo de esta especie.

Los resultados de los parámetros evaluados fueron obtenidos por el laboratorio certificado de CONSECAL (Consultores y Servicios en Calidad de Alimentos, S.A. de C.V.), contratado por una empresa privada interesada en la realización del proyecto acuícola en la zona.

Imagen 12. Puntos de muestreo



4.3.1 Descripción de cada sitio de muestreo

La ubicación de cada punto se muestra en la tabla 12, dichos puntos fueron tomados dentro del embalse, en la época de lluvias, el día 24 de septiembre de 2016.

Tabla 12. Geolocalización de los puntos de muestreo

Lugar	Fecha	Hora	Coordenadas geográficas	
			Latitud	Longitud
Punto 1 (P1): Las Danzas, Municipio de Nuevo Balsas Guerrero.	24/09/2016	18:14	18° 00' 52.93" N	99° 46' 16.64" O
Punto 2 (P2): Boca del Río, Rio Cuetzala, Zutpango, Guerrero.	24/09/2016	11:25	18°00'47.61" N	99°46'27.93" O
Punto 3 (P3): Río Cuetzala (frente a Balsas Viejo)	24/09/2016	13:01	18° 01' 10.80" N	99° 46' 58.33" O

Lugar	Fecha	Hora	Coordenadas geográficas	
			Latitud	Longitud
Punto 4 (P4): Municipio de Zutpango Guerrero	24/09/2016		18°00'52.24" N	99°46'43.54" O
Punto 5 (P5): Descarga de la Mina, Municipio de Cocula, Guerrero	25/09/2016	09:46	18° 0'52.56"N	99°45'52.98"O

4.3.2 Tipo de muestras

En la tabla 13 se describe el tipo de muestras que se obtuvieron para la determinación de los parámetros.

Tabla 13. Puntos de muestreo e identificación de muestras

Punto de muestreo	Identificador	Tipo de muestreo	Tipo de muestra
Punto 1	Muestra 1	Muestra de agua superficial	Puntual
	P1	Muestra de agua superficial (huevos de helminto)	Puntual
	Muestra 6	Muestra de agua superficial (coliformes fecales)	Puntual
Punto 2	Muestra 2a	Muestra de agua superficial	Puntual
	Muestra 2b	Muestra de agua a una profundidad de 13 m	Puntual
Punto 3	Muestra 3	Muestra de agua superficial	Puntual
Punto 4	Muestra 4	Muestra de agua superficial	Puntual
	Muestra 4	Muestra de agua superficial (huevos de helminto)	Puntual
	Muestra 7	Muestra de agua superficial (coliformes fecales)	Puntual
Punto 5	Muestra 5	Muestra de agua superficial (río de descarga de la mina)	Puntual

4.4 Resultados fisicoquímicos determinados *in situ*

Durante el levantamiento de la información en campo, se analizaron los parámetros que se describen brevemente en la tabla 14:

Tabla 14. Parámetros fisicoquímicos determinados *in situ*

	Punto 1 (24/09/2016)	Punto 2 (24/09/2016)	Punto 3 (24/09/2016)	Punto 4 (24/09/2016)	Punto 5 (25/09/2016)
Hora	18:14	17:28	13:01	11:25	09:46
Sitio	Las Danzas, Municipio de Nuevo Balsas Guerrero	Boca del Río, Rio Cuetzala, Zutpango, Guerrero.	Río Cuetzala (frente a Balsas Viejo)	Municipio de Zutpango Guerrero	Descarga de la Mina, Municipio de Cocula, Guerrero
pH	8.5	8.5	8.5	8.2	7.0
Temperatura °C	25.1 °C a 5m 28.8 °C superficie	25.2 °C a 5m 29.7 °C superficie	25.2 °C a 5m 28.6 °C superficie	25.0°C a 5m 27.2 °C superficie	26.3°C a 5m 27.1 °C superficie
Sólidos suspendidos (mg/l)			A 5m de profundidad 15.75	A 13.80m de profundidad 0.6	A 10m de profundidad 2.0
Observaciones	Profundidad de 12.28 m	Profundidad de 13.59m Presencia de Basura (pet), troncos, unicel	Profundidad de 15.75 m	Profundidad de 13.80 m	Profundidad de 3.15 m

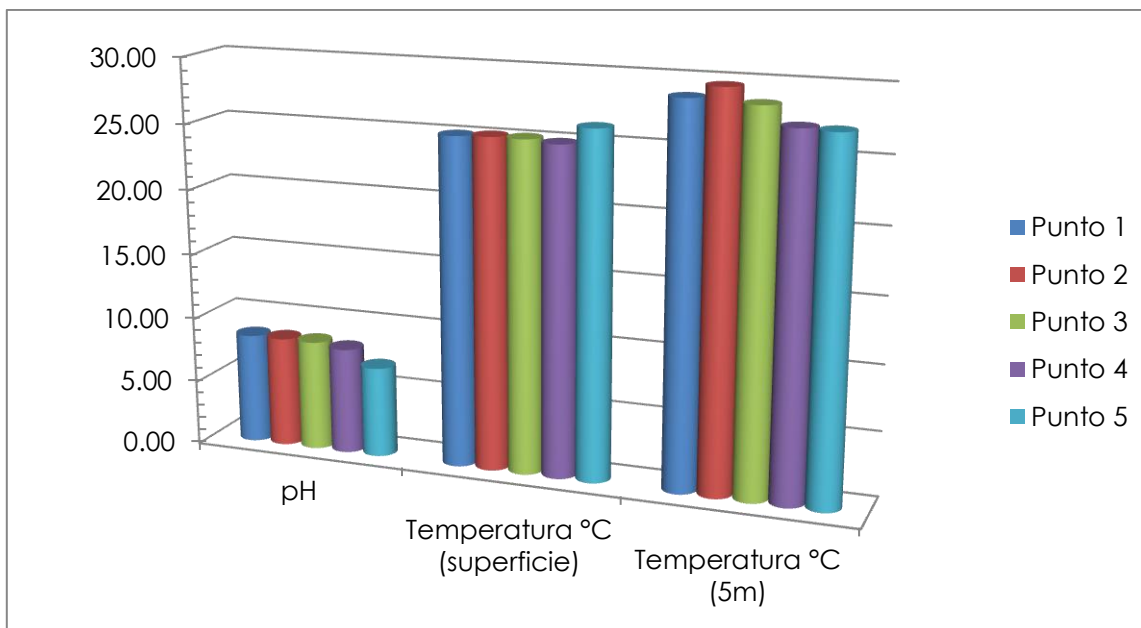


Figura 2. Parámetros fisicoquímicos determinados in situ

4.4.1 Medio de transporte

Se protegieron los frascos para que no estuvieran expuestos a la luz directa del sol y durante su traslado, se conservaron con hielo, evitando cambios de temperatura ambiental.

4.5 Resultados de parámetros determinados en laboratorio

Los parámetros que se determinaron para obtener una caracterización del agua en los sitios descritos anteriormente son:

Tabla 15. Parámetros determinados

Parámetro	Unidades	Método
Arsénico	mg/l	NMX-AA-051-SCFI-2001
Cadmio	mg/l	NMX-AA-051-SCFI-2001
Cianuros totales	mg/l	NMX-AA-058-SCFI-2001
Cobre	mg/l	NMX-AA-051-SCFI-2001
Coliformes totales	NMP/100 ml	NMX-AA-042-1987
Cromo total	mg/l	NMX-AA-051-SCFI-2001
Demanda bioquímica de oxígeno total	mg/l	NMX-AA-028-SCFI-2001
Fósforo total	mg P/l	NMX-AA-029-SCFI-2001
Grasas y aceites	mg/l	NMX-AA-005-SCFI-2013
Mercurio	mg/l	NMX-AA-051-SCFI-2001
Níquel	mg/l	NMX-AA-051-SCFI-2001
Nitrógeno de nitratos	mg/l	NMX-AA-079-SCFI-2001
Nitrógeno de nitritos	mg/l	NMX-AA-099-SCFI-2006
Nitrógeno total	mg/l	NOM-001-SEMARNAT-1996

Parámetro	Unidades	Método
Nitrógeno total Kjeldahl	mg/l	NMX-AA-026-SCFI-2010
Plomo	mg/l	NMX-AA-051-SCFI-2001
Sólidos sedimentables	mg/l	NMX-AA-004-SCFI-2013
Sólidos suspendidos totales	mg/l	NMX-AA-034-SCFI-2015
Zinc	mg/l	NMX-AA-051-SCFI-2001

Cabe resaltar que no se obtuvieron los mismos parámetros en todas las estaciones ya que para los alcances del proyecto acuícola se especificaron cuáles se debían determinar en cada punto de muestreo según lo requerido a sus necesidades.

4.5.1 Resultado de parámetros físicos

Para el presente estudio, únicamente se cuantificaron los *sólidos suspendidos totales* según lo estipulado en la NMX-AA-034-SCFI-2015 y los *sólidos sedimentables* con base en lo establecido en la NMX-AA-004-SCFI-2013. Los resultados se presentan a continuación:

Muestra 1

Ubicación	18° 00' 52.93" N	99° 46' 16.64" O
Sólidos sedimentables	0.3 ml/l	
Sólidos suspendidos totales	12 mg/l	

Muestra 2A

Ubicación	18°00'47.61" N	99°46'27.93" O
Sólidos sedimentables	<(LCM=0.1) ml/l	
Sólidos suspendidos totales	8 mg/l	

Muestra 2B

Ubicación	18°00'47.61" N	99°46'27.93" O
Sólidos sedimentables	0.5 ml/l	
Sólidos suspendidos totales	14 mg/l	

Muestra 3

Ubicación	18° 01' 10.80" N	99° 46' 58.33" O
Sólidos sedimentables	<(LCM=0.1) ml/l	
Sólidos suspendidos totales	<(CMC=5) mg/l	

Muestra 4

Ubicación	18°00'52.24" N	99°46'43.54" O
Sólidos sedimentables	<(LCM=0.1) ml/l	
Sólidos suspendidos totales	<(CMC=5) mg/l	

Muestra 5

Ubicación	18° 0'52.56"N	99°45'52.98"O
Sólidos sedimentables	0.6 ml/l	
Sólidos suspendidos totales	10 mg/l	

4.5.2 Resultado de parámetros químicos

Los parámetros químicos de calidad del agua están relacionados con la capacidad del agua para disolver diversas sustancias, que pueden ser de origen natural o por contaminación, y los efectos que estas sustancias pueden causar a la salud humana, a la flora y fauna del lugar, dependerán de su concentración en el agua.

A continuación se presentan los resultados del informe oficial realizado por el laboratorio acreditado.

a) Nutrientes

Muestra 1

Ubicación	18° 00' 52.93" N	99° 46' 16.64" O
Fósforo total	<(LCM=0.300) mg/l	
Nitrógeno de nitratos	1.33 mg/l	
Nitrógeno de nitritos	<(LCM=0.0300) mg/l	
Nitrógeno total	<(LCM=16.3) mg/l	
Nitrógeno total Kjeldahl	<(LCM=16.3) mg/l	

Muestra 2A

Ubicación	18°00'47.61" N	99°46'27.93" O
Fósforo total	<(LCM=0.300) mg/l	
Nitrógeno de nitratos	1.08 mg/l	
Nitrógeno de nitritos	0.0392 mg/l	
Nitrógeno total	<(LCM=16.3) mg/l	
Nitrógeno total Kjeldahl	<(LCM=16.3) mg/l	

Muestra 2B

Ubicación	18°00'47.61" N	99°46'27.93" O
Fósforo total	<(LCM=0.300) mg/l	
Nitrógeno de nitratos	0.965 mg/l	
Nitrógeno de nitritos	<(LCM=0.0300) mg/l	
Nitrógeno total	<(LCM=16.3) mg/l	
Nitrógeno total Kjeldahl	<(LCM=16.3) mg/l	

Muestra 3

Ubicación	18° 01' 10.80" N	99° 46' 58.33" O
Fósforo total	<(LCM=0.300) mg/l	
Nitrógeno de nitratos	1.39 mg/l	
Nitrógeno de nitritos	0.0351 mg/l	

Nitrógeno total	<(LCM=16.3) mg/l
Nitrógeno total Kjeldahl	<(LCM=16.3) mg/l

Muestra 4

Ubicación	18°00'52.24" N 99°46'43.54" O
Fósforo total	<(LCM=0.300) mg/l
Nitrógeno de nitratos	1.52 mg/l
Nitrógeno de nitritos	<(LCM=0.0300) mg/l
Nitrógeno total	<(LCM=16.3) mg/l
Nitrógeno total Kjeldahl	<(LCM=16.3) mg/l

Muestra 5

Ubicación	18° 0'52.56"N 99°45'52.98"O
Fósforo total	<(LCM=0.300) mg/l
Nitrógeno de nitratos	1.30 mg/l
Nitrógeno de nitritos	<(LCM=0.0300) mg/l
Nitrógeno total	<(LCM=16.3) mg/l
Nitrógeno total Kjeldahl	<(LCM=16.3) mg/l

b) Tóxicos inorgánicos (metales pesados)

La toxicidad de cada uno de ellos depende del grado y la forma de oxidación del ión metálico dado. A continuación se presentan los resultados obtenidos después del análisis de laboratorio.

Muestra 1

Ubicación	18° 00' 52.93" N 99° 46' 16.64" O
Arsénico	0.0112 mg/l
Cadmio	<(LCM=0.0200) mg/l
Cianuros totales	<(LCM=0.0200) mg/l
Cobre	<(LCM=0.400) mg/l
Cromo total	<(LCM=0.100) mg/l
Mercurio	0.00163
Níquel	<(LCM=0.400) mg/l
Plomo	<(LCM=0.100) mg/l
Zinc	0.138 mg/l

Muestra 2A

Ubicación	18°00'47.61" N 99°46'27.93" O
Arsénico	0.00546 mg/l
Cadmio	<(LCM=0.0200) mg/l
Cianuros totales	<(LCM=0.0200) mg/l
Cobre	<(LCM=0.400) mg/l
Cromo total	<(LCM=0.100) mg/l
Mercurio	<(LCM=0.000500) mg/l
Níquel	<(LCM=0.400) mg/l

Plomo	<(LCM=0.100) mg/l
Zinc	<(LCM=0.0100) mg/l

Muestra 2B

Ubicación	18°00'47.61" N 99°46'27.93" O
Arsénico	0.00851 mg/l
Cadmio	<(LCM=0.0200) mg/l
Cianuros totales	<(LCM=0.0200) mg/l
Cobre	<(LCM=0.400) mg/l
Cromo total	<(LCM=0.100) mg/l
Mercurio	0.000637 mg/l
Níquel	<(LCM=0.400) mg/l
Plomo	<(LCM=0.100) mg/l
Zinc	0.0649 mg/l

Muestra 3

Ubicación	18° 01' 10.80" N 99° 46' 58.33" O
Arsénico	0.0106 mg/l
Cadmio	<(LCM=0.0200) mg/l
Cianuros totales	<(LCM=0.0200) mg/l
Cobre	<(LCM=0.400) mg/l
Cromo total	<(LCM=0.100) mg/l
Mercurio	<(LCM=0.000500) mg/l
Níquel	<(LCM=0.400) mg/l
Plomo	<(LCM=0.100) mg/l
Zinc	<(LCM=0.0100) mg/l

Muestra 4

Ubicación	18°00'52.24" N 99°46'43.54" O
Arsénico	0.0109 mg/l
Cadmio	<(LCM=0.0200) mg/l
Cianuros totales	<(LCM=0.0200) mg/l
Cobre	<(LCM=0.400) mg/l
Cromo total	<(LCM=0.100) mg/l
Mercurio	<(LCM=0.000500) mg/l
Níquel	<(LCM=0.400) mg/l
Plomo	<(LCM=0.100) mg/l
Zinc	<(LCM=0.0100) mg/l

Muestra 5

Ubicación	18° 0'52.56"N 99°45'52.98"O
Arsénico	0.368 mg/l
Cadmio	<(LCM=0.0200) mg/l
Cianuros totales	<(LCM=0.0200) mg/l
Cobre	0.405 mg/l
Cromo total	<(LCM=0.100) mg/l
Mercurio	0.00112 mg/l
Níquel	<(LCM=0.400) mg/l
Plomo	<(LCM=0.100) mg/l
Zinc	0.440 mg/l

c) Parámetros químicos orgánicos

Los parámetros químicos orgánicos determinados para este estudio son:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno
- Oxígeno disuelto
- Grasas y aceites

A continuación se presentan los resultados de cada una de las muestras tomadas:

Muestra 1

Ubicación	18° 00' 52.93" N 99° 46' 16.64" O
Grasas y aceites	41.9 mg/l
Demanda bioquímica de oxígeno	9.51 mg/l
Oxígeno disuelto	6.60 mg/l

Muestra 2A

Ubicación	18°00'47.61" N 99°46'27.93" O
Grasas y aceites	<(LCM=5.65) mg/l
Demanda bioquímica de oxígeno	11.75 mg/l
Oxígeno disuelto	2.95 mg/l

Muestra 2B

Ubicación	18°00'47.61" N 99°46'27.93" O
Grasas y aceites	<(LCM=5.65) mg/l
Demanda bioquímica de oxígeno	12.48 mg/l
Oxígeno disuelto	2.95 mg/l

Muestra 3

Ubicación	18° 01' 10.80" N 99° 46' 58.33" O
Grasas y aceites	<(LCM=5.65) mg/l
Demanda bioquímica de oxígeno	9 mg/l
Oxígeno disuelto	3.31 mg/l

Muestra 4

Ubicación	18°00'52.24" N	99°46'43.54" O
Grasas y aceites	50.6 mg/l	
Demanda bioquímica de oxígeno	9.52 mg/l	
Oxígeno disuelto	5.617 mg/l	

Muestra 5

Ubicación	18° 0'52.56"N	99°45'52.98"O
Grasas y aceites	62 mg/l	
Demanda bioquímica de oxígeno	9.08 mg/l	
Oxígeno disuelto	3.33 mg/l	

4.5.3 Resultado de parámetros microbiológicos

Estos análisis están orientados a la detección de organismos patógenos que causan enfermedades y se encuentran en el agua debido a la contaminación de la misma.

P1

Ubicación	18° 00' 52.93" N	99° 46' 16.64" O
Huevos de helminto	0 H/L	

Muestra 4

Ubicación	18°00'52.24" N	99°46'43.54" O
Huevos de helminto	0 H/L	

Muestra 6

Ubicación	18° 00' 52.93" N	99° 46' 16.64" O
Coliformes fecales	75 NMP/100m	

Muestra 7

Ubicación	18°00'52.24" N	99°46'43.54" O
Coliformes fecales	1100 NMP/100ml	

*LCM= límite de cuantificación del método

*CMC= cantidad mínima cuantificable

*NPM= número más probable

4.6 Cálculo de los índices de calidad del agua

Con el fin de proporcionar una interpretación de los resultados obtenidos, se calculará el llamado Índice de Calidad del Agua (ICA) que es el empleado en México.

Este índice de calidad de agua tiene como características que el valor del grado de contaminación determina el uso a que puede destinarse el agua de la cuenca hidrológica en estudio.

Para fines comparativos, también se calculará con el método de Dinius, modificado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y posteriormente para incluir a esta evaluación los metales pesados, se utilizará el UWQI (Europa).

4.6.1 Cálculo del índice de Calidad del Agua (ICA)

Para el cálculo, se emplearon las siguientes ecuaciones (tabla 16) con el fin de conocer el índice de calidad individual para cada parámetro, el cual, posteriormente se multiplicará por su importancia relativa.

Tabla 16. Índice de calidad individual para cada parámetro

Parámetro	Ecuación	Unidades
Coliformes fecales	$I_{CF} = 97.5 * (5 * CF)^{-0.27}$	NMP/ml
DBO	$I_{DBO} = 120 * DBO^{-0.0673}$	mg/l
Fosfatos totales	$I_{PO_4} = 34.215 * PO_4^{-0.46}$	mg/l
Grasas y aceites	$I_{GyA} = 87.25 * GyA^{-0.298}$	mg/l
Nitrógeno de nitratos	$I_{NO_3} = 162.2 * NO_3^{-0.343}$	mg/l
Oxígeno disuelto	$I_{OD} = 100 * \left(\frac{OD}{OD_{sat}} \right)$	mg/l
Sólidos suspendidos	$I_{SS} = 266.5 * SS^{-0.37}$	mg/l

Fuente: Evaluación de la calidad del agua mediante técnicas de percepción remota (Vázquez A., Sepúlveda R. y Fuentes V., 2015).

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Punto 1- Muestra 1				
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Ii*Wi
Sólidos suspendidos	12	100	1	100
Grasas y aceites	41.9	28.66458489	2	57.3291698
N de nitratos	1.33	100	2	200
Fosfatos totales	ND	100	2	200
Oxígeno disuelto	6.6	87.19931973	5	435.996599
DBO	9.51	26.35516613	5	131.775831
Coliformes fecales	75	19.67959576	4	78.7183831
Suma=			21	1203.81998

Datos
 Patm 0.945
 Cte. Henry 46612
 OD sat 7.5688664

ICA= 57.3247611

Punto 2- Muestra 2a				
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Ii*Wi
Sólidos suspendidos	8	100	1	100
Grasas y aceites	ND	100	2	200
N de nitratos	1.08	100	2	200
Fosfatos totales	ND	100	2	200
Oxígeno disuelto	2.95	39.53234127	5	197.661706
DBO	11.75	22.85839651	5	114.291983
Suma=			17	1011.95369

Datos
 Patm 0.945
 Cte. Henry 47278
 OD sat 7.4622446

ICA= 59.5266876

Punto 2- Muestra 2b				
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Ii*Wi
Sólidos suspendidos	14	100	1	100
Grasas y aceites	ND	100	2	200
N de nitratos	0.965	100	2	200
Fosfatos totales	ND	100	2	200
Oxígeno disuelto	2.95	39.53234127	5	197.6617063
DBO	12.48	21.94971219	5	109.748561
Suma=			17	1007.410267

Datos
 Patm 0.945
 Cte. Henry 47278
 OD sat 7.4622446

ICA= 59.25942749

Punto 3- Muestra 3				
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Ii*Wi
Sólidos suspendidos	ND	100	1	100
Grasas y aceites	ND	100	2	200
N de nitratos	1.39	100	2	200
Fosfatos totales	ND	100	2	200
Oxígeno disuelto	3.309	43.5797551	5	217.898776
DBO	9	27.35117808	5	136.75589
Suma=			17	1054.65467

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 46464

OD sat 7.5929752

ICA= 62.0385098

Punto 4- Muestra 4				
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Ii*Wi
Sólidos suspendidos	1	100	1	100
Grasas y aceites	50.6	27.09745986	2	54.1949197
N de nitratos	1.52	100	2	200
Fosfatos totales	ND	100	2	200
Oxígeno disuelto	3.309	43.71856803	5	218.59284
DBO	9.52	26.3365316	5	131.682658
Coliformes fecales	1100	9.530302583	4	38.1212103
Suma=			21	942.591628

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 46612

OD sat 7.5688664

ICA= 44.8853156

Punto 5				
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(I_i)	Importancia relativa (W_i)	$I_i \cdot W_i$
Sólidos suspendidos	10	100	1	100
Grasas y aceites	62	25.50543366	2	51.0108673
N de nitratos	1.3	100	2	200
Fosfatos totales	ND	100	2	200
DBO	9.08	27.18876431	5	135.943822
Suma=			12	686.954689

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 46612

OD sat 7.5688664

ICA= 57.2462241

*ND= No detectable

4.6.2 Cálculo del ICA IMTA-II UNAM

La evaluación numérica de este índice en México se basa en la medida geométrica del método de Dinius (1974) con modificaciones del Instituto de Ingeniería UNAM (1987), utilizando las técnicas multiplicativas, que son más sensibles que las aditivas a la variación de los parámetros, por lo que se espera que reflejen con mayor precisión un cambio de calidad.

Para conocer el índice de calidad individual de cada parámetro, se utilizaron las ecuaciones mostradas en la tabla 16.

En la tabla 17 se muestran los pesos específicos asignados a cada parámetro, ponderados entre 0 y 1.

Tabla 17. Pesos específicos designados para el cálculo del ICA IMTA-II UNAM

Parámetro	Unidad	Peso (W_i)
Oxígeno disuelto	%sat	0.103
DBO	mg/l	0.096
DQO	mg/l	0.053
pH	u pH	0.063
Sólidos suspendidos	mg/l	0.033
Coliformes totales	#/100 ml	0.083
Coliformes fecales	#/100 ml	0.143
Nitratos	mg/l	0.053
N amoniacal	mg/l	0.043

Parámetro	Unidad	Peso (W_i)
Fosfatos	mg/l	0.073
Fenoles	µg/l	0.033
Diferencia de temperatura	°C	0.043
Alcalinidad	mg/l $CaCO_3$	0.055
Dureza	mg/l $CaCO_3$	0.058
Cloruros	mg/l	0.068

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Punto 1- Muestra 1					
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(I_i)	Importancia relativa (W_i)	W_i corregido	$I_i^{W_i}$
Sólidos suspendidos	12	100	0.033	0.065868263	1.35436751
N de nitratos	1.33	100	0.053	0.105788423	1.62770931
Fosfatos totales	ND	100	0.073	0.145708583	1.95621762
Oxígeno disuelto	6.6	87.19931973	0.103	0.205588822	2.50580806
DBO	9.51	26.35516613	0.096	0.191616766	1.87180974
Coliformes fecales	75	19.67959576	0.143	0.285429142	2.34072248
Suma=			0.501	1	

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 46612

OD sat 7.5688664

ICA= 47.3467277

Punto 2- Muestra 2a					
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Wi corregido	Ii^Wi
Sólidos suspendidos	8	100	0.033	0.092178771	1.52882418
N de nitratos	1.08	100	0.053	0.148044693	1.97737658
Fosfatos totales	ND	100	0.073	0.203910615	2.5575329
Oxígeno disuelto	2.95	39.53234127	0.103	0.287709497	2.8804372
DBO	11.75	22.85839651	0.096	0.268156425	2.31439164
Suma=			0.358	1	

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 47278

OD sat 7.4622446

ICA= 51.5422556

Punto 2- Muestra 2b					
Parámetro	Valor	Indice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Wi corregido	Ii^Wi
Sólidos suspendidos	14	100	0.033	0.092178771	1.528824176
N de nitratos	0.965	100	0.053	0.148044693	1.977376577
Fosfatos totales	ND	100	0.073	0.203910615	2.557532899
Oxígeno disuelto	2.95	39.53234127	0.103	0.287709497	2.880437201
DBO	12.48	21.94971219	0.096	0.268156425	2.289352981
Suma=			0.358	1	

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 47278

OD sat 7.4622446

ICA= 50.9846364

Punto 3- Muestra 3					
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Wi corregido	Ii^Wi
Sólidos suspendidos	ND	100	0.033	0.092178771	1.52882418
N de nitratos	1.39	100	0.053	0.148044693	1.97737658
Fosfatos totales	ND	100	0.073	0.203910615	2.5575329
Oxígeno disuelto	3.309	43.5797551	0.103	0.287709497	2.96235977
DBO	9	27.35117808	0.096	0.268156425	2.42847902
Suma=			0.358	1	

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 46464

OD sat 7.5929752

ICA= 55.6211949

Punto 4- Muestra 4					
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro(Ii)	Importancia relativa (Wi)	Wi corregido	Ii^Wi
Sólidos suspendidos	1	100	0.033	0.065868263	1.35436751
N de nitratos	1.52	100	0.053	0.105788423	1.62770931
Fosfatos totales	ND	100	0.073	0.145708583	1.95621762
Oxígeno disuelto	3.309	43.71856803	0.103	0.205588822	2.17421544
DBO	9.52	26.3365316	0.096	0.191616766	1.87155607
Coliformes fecales	1100	9.530302583	0.143	0.285429142	1.90311741
Suma=			0.501	1	

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 46612

OD sat 7.5688664

ICA= 33.3965449

Punto 5					
Parámetro	Valor	Índice de calidad del parámetro (Ii)	Importancia relativa (Wi)	Wi corregido	Ii^Wi
Sólidos suspendidos	10	100	0.033	0.129411765	1.8147781
N de nitratos	1.3	100	0.053	0.207843137	2.6042716
Fosfatos totales	ND	100	0.073	0.28627451	3.73722306
DBO	9.08	27.18876431	0.096	0.376470588	3.467412
Suma=			0.255	1	

Datos

Patm 0.945

Cte. Henry 46612

OD sat 7.5688664

ICA= 61.244102

4.6.3 Cálculo del UWQI

Para el cálculo de este índice se emplearon las siguientes ecuaciones:

Tabla 18. Ecuaciones matemáticas formuladas para el UWQI

Parámetro	Rango	Ecuación
Arsénico	$x \leq 0.02$	$y = 100$
	$0.02 < x \leq 0.05$	$y = -1666.7x + 133.33$
	$0.05 < x \leq 0.1$	$y = -900x + 95$
	$x > 0.1$	$y = 0$
Cadmio	$x \leq 0.003$	$y = 100$
	$0.003 < x \leq 0.005$	$y = -25000x + 175$
	$0.005 < x \leq 0.010$	$y = -9000x + 95$
	$x > 0.010$	$y = 0$
Cianuro	$x \leq 0.01$	$y = 100$
	$0.01 < x \leq 0.05$	$y = -1250x + 112.5$
	$0.05 < x \leq 0.1$	$y = -900x + 95$
	$x > 0.1$	$y = 0$
DBO	$x < 3$	$y = 100$
	$3 \leq x < 5$	$y = -25x + 175$
	$5 \leq x < 7$	$y = -22.5x + 162.5$

Parámetro	Rango	Ecuación
	$x \geq 7$	$y = 0$
Fósforo total	$x \leq 0.02$	$y = 100$
	$0.02 < x \leq 0.16$	$y = -357.14x + 107.14$
	$0.16 < x \leq 0.65$	$y = -91.837x + 64.694$
	$x > 0.65$	$y = 0$
Mercurio	$x \leq 0.0001$	$y = 100$
	$0.0001 < x \leq 0.0005$	$y = -125000x + 112.5$
	$0.0005 < x \leq 0.002$	$y = -30000x + 65$
	$x > 0.002$	$y = 0$
Nitrógeno de nitratos	$x \leq 5$	$y = 100$
	$5 < x \leq 10$	$y = -10x + 150$
	$10 < x \leq 20$	$y = -4.5x + 95$
	$x > 20$	$y = 0$
Oxígeno disuelto	$x \geq 8$	$y = 100$
	$8 < x \leq 6$	$y = 25x - 100$
	$6 < x \leq 3$	$y = 15x - 40$
	$x < 3$	$y = 0$

Fuente: Development of a water quality index based on a European classification scheme

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Punto 1- Muestra 1					
Parámetros	Valor	Unidades	Wi	li	Wi*li
Arsénico	0.0112	mg/l	0.113	100	11.3
Cadmio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Cianuro	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
DBO	9.51	mg/l	0.057	0	0
Fósforo total	LCM	mg/l	0.057	100	5.7
Mercurio	0.00163	mg/l	0.086	16.1	1.3846
Nitrógeno de nitratos	1.33	mg/l	0.086	100	8.6
Oxígeno disuelto	6.6	mg/l	0.114	65	7.41
				ICA UWQI	51.5946

Punto 2- Muestra 2a					
Parámetros	Valor	Unidades	Wi	li	Wi*li
Arsénico	0.00546	mg/l	0.113	100	11.3
Cadmio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Cianuro	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
DBO	11.75	mg/l	0.057	0	0
Fósforo total	LCM	mg/l	0.057	100	5.7
Mercurio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Nitrógeno de nitratos	1.08	mg/l	0.086	100	8.6
Oxígeno disuelto	2.95	mg/l	0.114	4.25	0.4845
				ICA UWQI	51.8845

Punto 2- Muestra 2b					
Parámetros	Valor	Unidades	Wi	li	Wi*li
Arsénico	0.00851	mg/l	0.113	100	11.3
Cadmio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Cianuro	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
DBO	12.48	mg/l	0.057	0	0
Fósforo total	LCM	mg/l	0.057	100	5.7
Mercurio	0.000637	mg/l	0.086	63.089	5.425654
Nitrógeno de nitratos	0.965	mg/l	0.086	100	8.6
Oxígeno disuelto	2.95	mg/l	0.114	4.25	0.4845
				ICA UWQI	48.710154

Punto 3- Muestra 3					
Parámetros	Valor	Unidades	Wi	li	Wi*li
Arsénico	0.0106	mg/l	0.113	100	11.3
Cadmio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Cianuro	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
DBO	9	mg/l	0.057	0	0
Fósforo total	LCM	mg/l	0.057	100	5.7
Mercurio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Nitrógeno de nitratos	1.39	mg/l	0.086	100	8.6
Oxígeno disuelto	3.309	mg/l	0.114	9.635	1.09839
				ICA UWQI	52.49839

Punto 4- Muestra 4					
Parámetros	Valor	Unidades	Wi	li	Wi*li
Arsénico	0.0109	mg/l	0.113	100	11.3
Cadmio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Cianuro	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
DBO	9.52	mg/l	0.057	0	0
Fósforo total	LCM	mg/l	0.057	100	5.7
Mercurio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Nitrógeno de nitratos	1.52	mg/l	0.086	100	8.6
Oxígeno disuelto	5.617	mg/l	0.114	44.255	5.04507
				ICA UWQI	56.44507

Punto 5- Muestra 5					
Parámetros	Valor	Unidades	Wi	li	Wi*li
Arsénico	0.368	mg/l	0.113	0	0
Cadmio	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
Cianuro	LCM	mg/l	0.086	100	8.6
DBO	9.08	mg/l	0.057	0	0
Fósforo total	LCM	mg/l	0.057	100	5.7
Mercurio	0.00112	mg/l	0.086	0	0
Nitrógeno de nitratos	1.3	mg/l	0.086	100	8.6
				ICA UWQI	31.5

4.7 Visualización e integración de la información geoespacial

El objetivo de este apartado es realizar una clasificación de zonas para comparar el estado del recurso en diferentes áreas geográficas.

4.7.1 Determinación de unidades físico-ambientales

Para facilitar la comprensión de la influencia que causa el uso y tipo de suelo de la zona de estudio en la calidad del agua en el embalse, se realizó una superposición de estos dos factores, dando como resultado áreas que comparten características y que ayudan a la clasificación territorial.

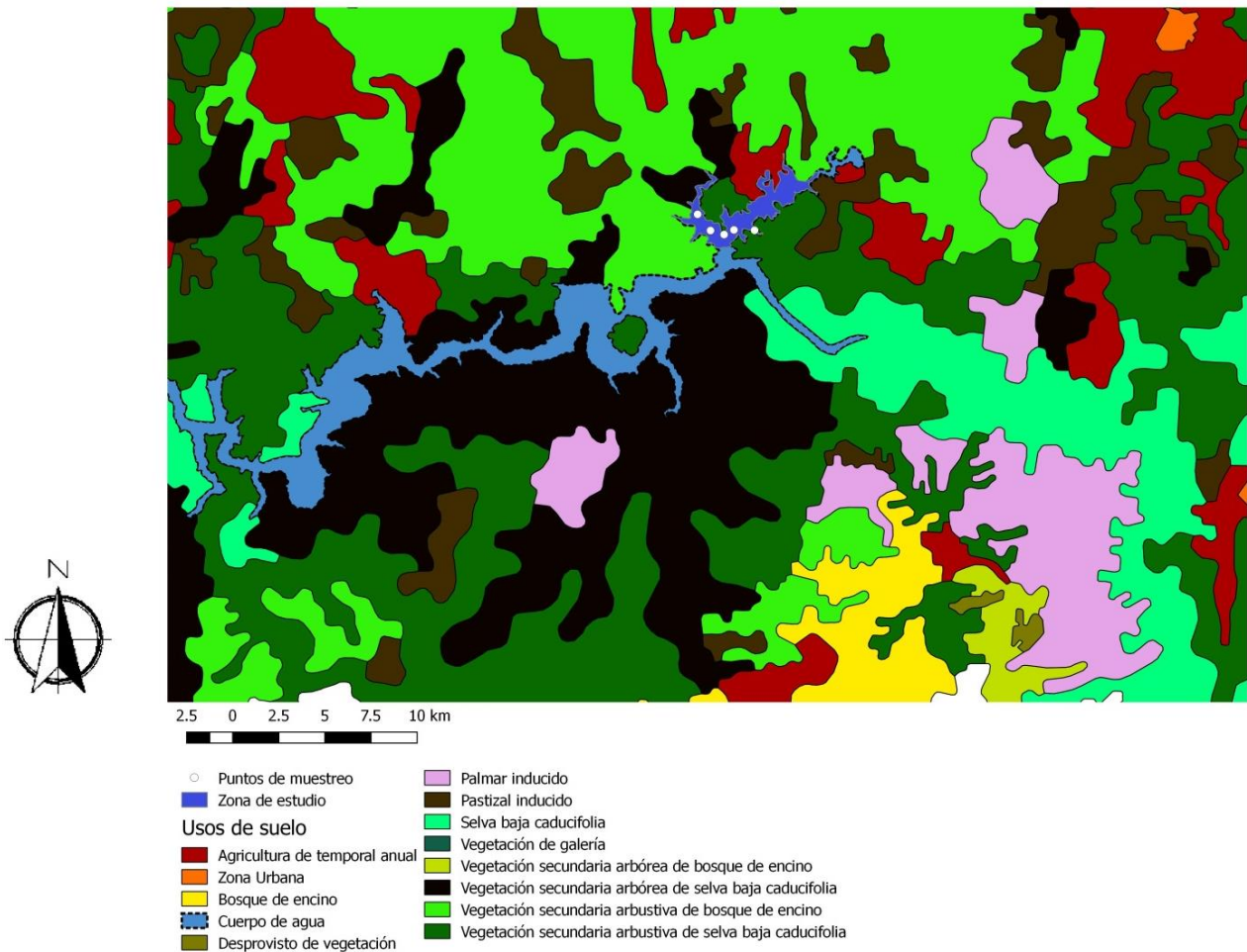
Estas áreas son llamadas: unidades físico-ambientales que se definen como zonas homogéneas tanto en sus características físicas como en su comportamiento ante determinadas actuaciones o estímulos exteriores.

Con ayuda del software QGIS se generaron modelos vectoriales, utilizando las capas: uso del suelo y vegetación y conjunto de datos vectoriales edafológicos (tabla 6).

Delimitando la información al sitio donde se realizó el muestreo y realizando una categorización de los datos, obtenemos los mapas: usos de suelo y vegetación (imagen 13) y edafología en el embalse (imagen 14).

En la imagen 13 podemos observar que en la zona de estudio el uso de suelo es de agricultura de temporal anual y también hay vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia y una vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia.

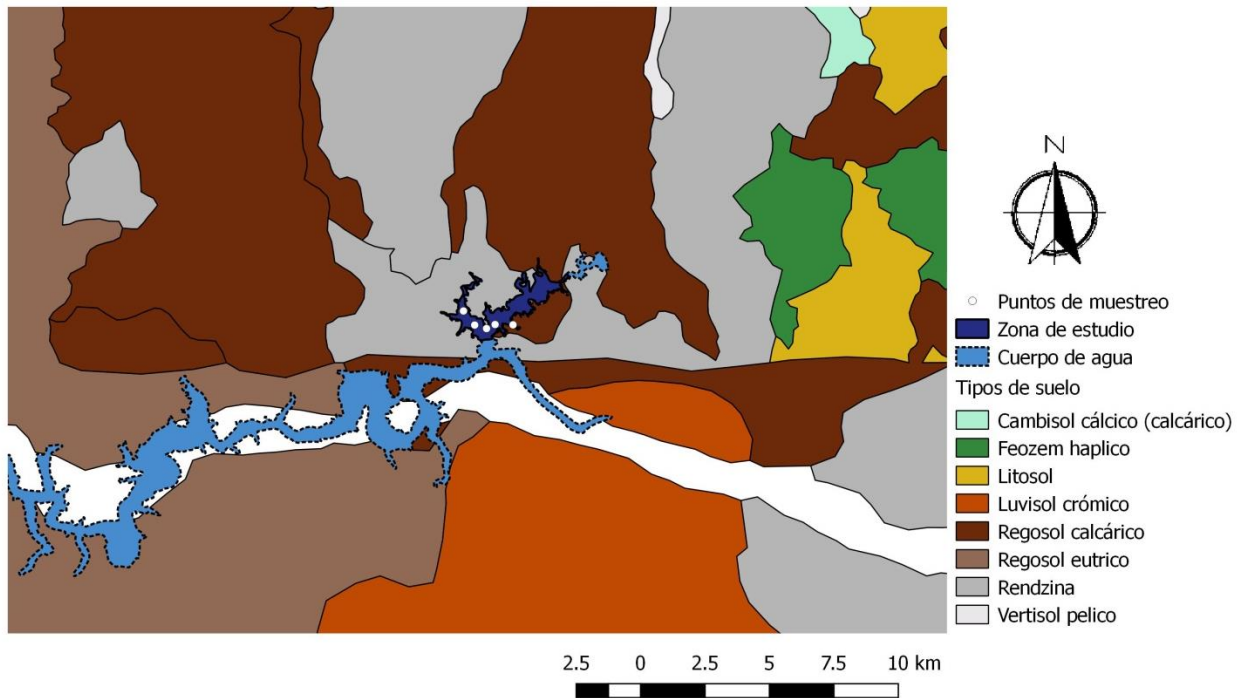
Imagen 13. Usos de suelo y vegetación en el embalse



Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

Limitando la Cuenca del Río Balsas a nuestro sitio de interés para obtener información sobre la edafología, podemos observar que únicamente existen dos tipos de suelo alrededor de este, que son, Regosol calcárico y Rendzina (imagen 14).

Imagen 14. Edafología en el embalse

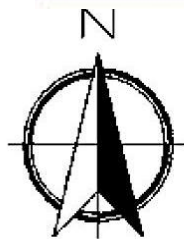
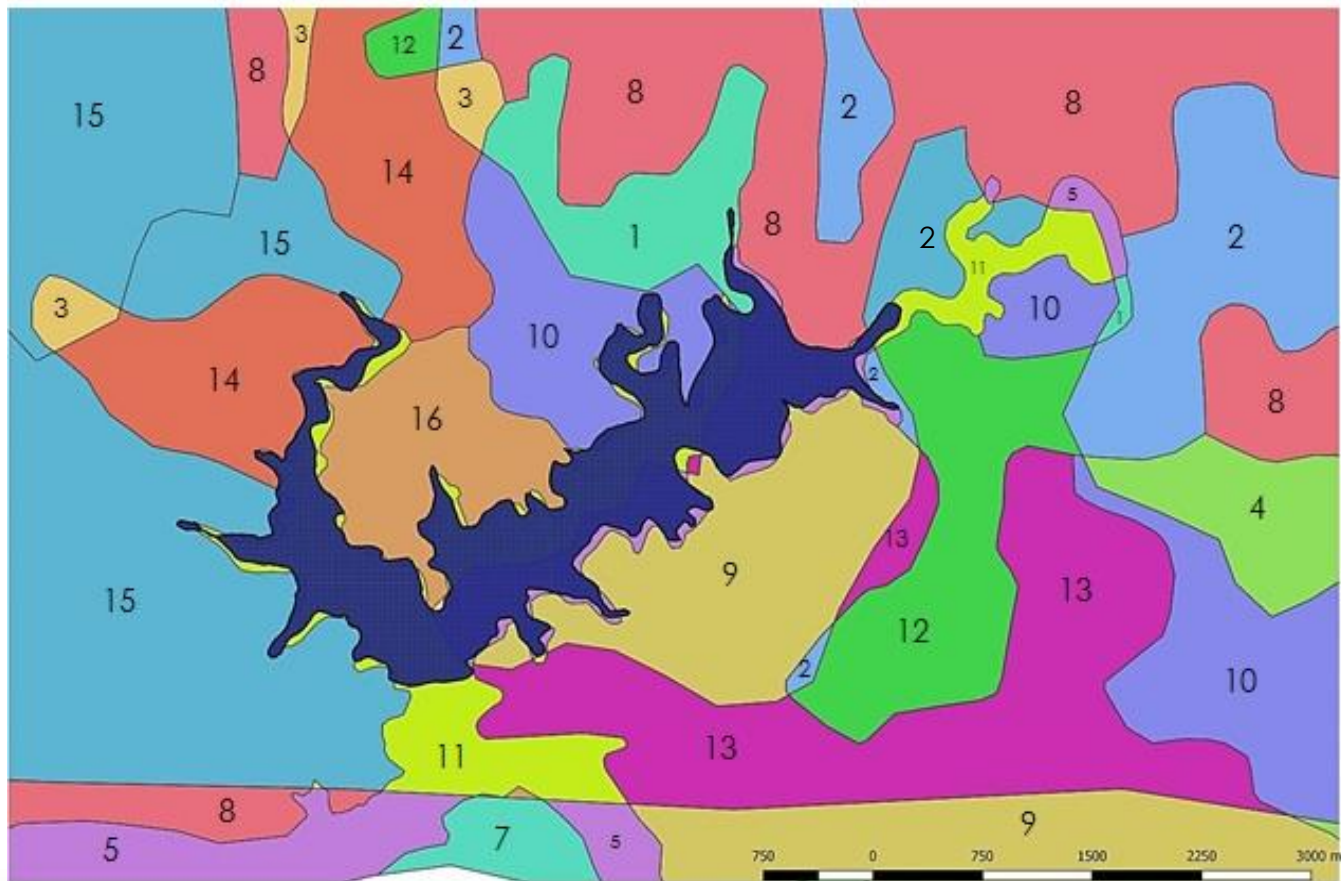


Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

Cabe aclarar que en la zona que se encuentra en color blanco no hay información disponible para poder realizar una clasificación.

Con base en los datos obtenidos anteriormente y realizando una intersección de capas, se llegó a la identificación de las unidades físico-ambientales homogéneas (imagen 15):

Imagen 15. Unidades físico-ambientales



- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Zona de estudio Tipos de suelo+Usos de suelo ■ No clasificado+Agricultura de temporal anual ■ No clasificado+Pastizal inducido ■ No clasificado+Vegetación secundaria arborea de selva baja caducifolia ■ Regosol calcárico+Agricultura de temporal anual ■ Regosol calcárico+Cuerpo de agua ■ Regosol calcárico+Selva baja caducifolia ■ Regosol calcárico+Vegetación secundaria arborea de selva baja caducifolia | <ul style="list-style-type: none"> ■ Regosol calcárico+Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino ■ Regosol calcárico+Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia ■ Rendzina+Agricultura de temporal anual ■ Rendzina+Cuerpo de agua ■ Rendzina+Pastizal inducido ■ Rendzina+Vegetación arbustiva de selva baja caducifolia ■ Rendzina+Vegetación secundaria arborea de selva baja caducifolia ■ Rendzina+Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino ■ Rendzina+Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia |
|---|--|

Fuente: Elaboración a partir de información obtenida del Geoportal del Sistema de Información sobre Biodiversidad

Las principales características de las unidades se describen y diagnostican en la tabla 19.

Tabla 19. Unidades físico-ambientales alrededor del embalse

Clase	Descripción de unidades (Edafología-Usos de suelo y vegetación)
1	Suelo no clasificado con un uso de suelo de agricultura de temporal anual
2	Suelo no clasificado con un uso de suelo de pastizal inducido
3	Suelo no clasificado con vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia
4	Regosol calcárico con un uso de suelo de agricultura de temporal anual
5	Cuerpo de agua donde el tipo de suelo es regosol calcárico
6	Regosol calcárico con selva baja caducifolia
7	Regosol calcárico con vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia
8	Regosol calcárico con vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino
9	Regosol calcárico con vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia
10	Rendzina con un uso de suelo de agricultura de temporal anual
11	Cuerpo de agua donde el tipo de suelo es rendzina
12	Rendzina con pastizal inducido
13	Rendzina con vegetación arbustiva de selva baja caducifolia
14	Rendzina con vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia
15	Rendzina con vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino
16	Rendzina con vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia

4.7.2 Clasificación no supervisada

Se realizó una clasificación no supervisada en el embalse, que servirá de apoyo para relacionar información de la calidad del agua de los puntos muestreados con otras zonas del cuerpo de agua.

Dicha clasificación se realizó con ayuda del software IDRISI 17.0, a través del comando CLUSTER que examina los datos y los divide en los grupos espectrales naturales más prevalecientes.

Este módulo realiza la clasificación basándose en un grupo de imágenes de entrada usando una técnica máxima de histograma multi-dimensional. Es importante reconocer, sin embargo, que los procedimientos de agrupamiento de clasificación no supervisada no son clases de información, sino clases espectrales (es decir, agrupan características, píxeles, con patrones de reflexión similares) (Eastman, 2004).

Para comenzar con el análisis, se descargó una imagen del portal de Servicio Geológico de los Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), buscando que fuera del día de muestreo (24 de septiembre de 2016), sin embargo, no hay archivo perteneciente a esa fecha, por lo que se trabajó con la imagen más

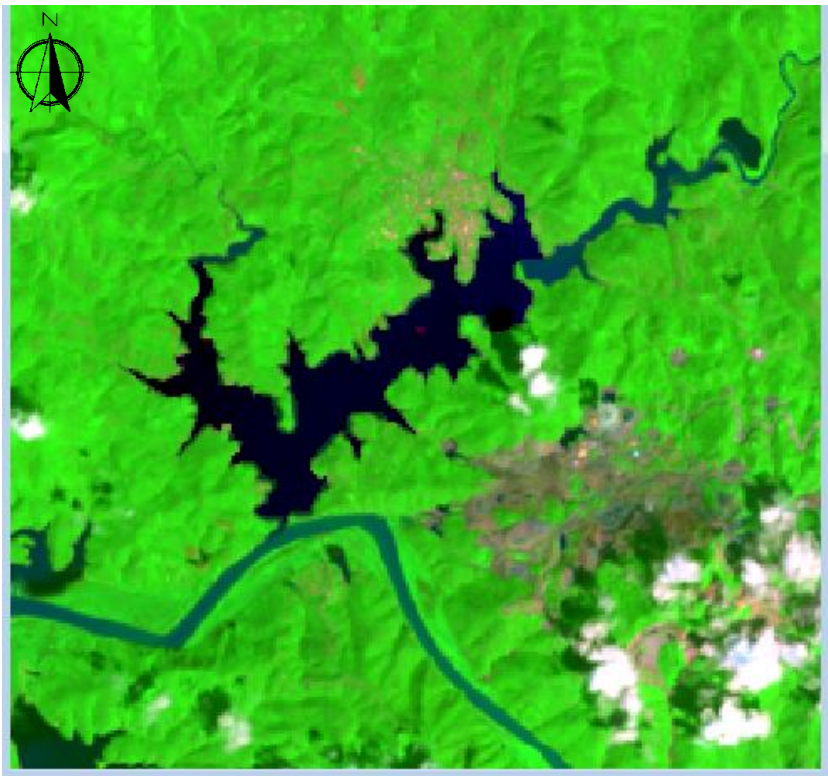
cercana al día y que cumpliera con las características adecuadas para su correcta visualización e interpretación.

La imagen obtenida del conjunto de datos del *L8/OLI/TIRS* para realizar la clasificación es la siguiente:

ID de entidad	Coordenadas	Fecha de adquisición
LC80260472016277LGN00	18.78752, -99.10115	3 de octubre de 2016

Se procedió a recortar los archivos de las bandas que conforman la imagen, adecuándola a la zona de estudio.

Imagen 16. Composición 753 (Natural con remoción atmosférica), creada a partir de los archivos recortados

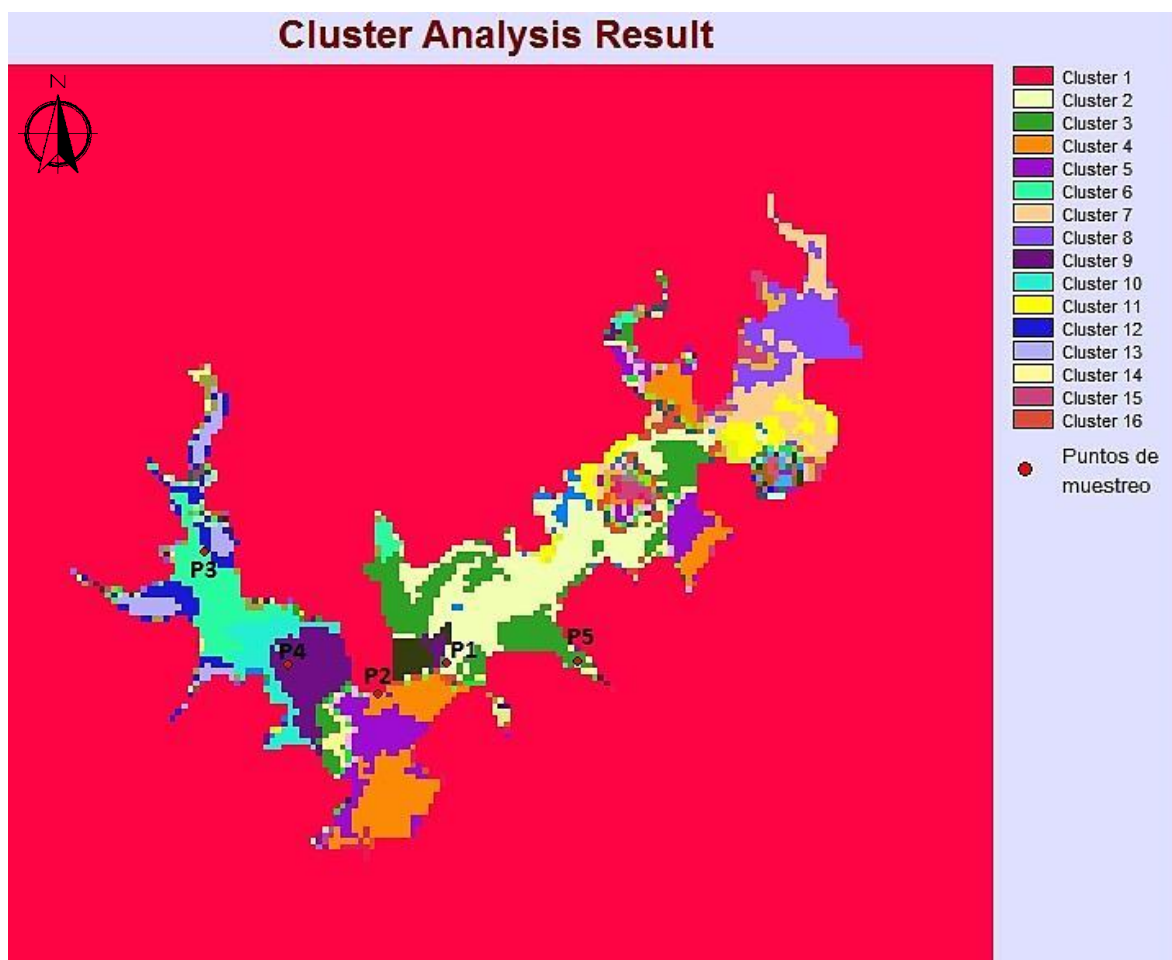


Posteriormente se realizó un enmascaramiento del embalse para obtener una capa vectorial. Los contornos vectoriales fueron rasterizados usando INITIAL (para copiar los parámetros contenidos en las bandas) y RASTERVECTOR que finalmente es el comando que nos permite convertir de un archivo vectorial a uno raster.

Una vez obtenidos los archivos raster del embalse, se realizó una clasificación no supervisada fina, con las bandas 1, 2, 3, 4 y 5 de la imagen, realizando varias pruebas hasta encontrar los niveles de gris adecuados, en este caso, 25, para desarrollar la segmentación de la capa raster que nos permitirá localizar las diferentes clases existentes de calidad del agua dentro del embalse.

El resultado de este procedimiento fue el siguiente:

Imagen 17. Resultado del análisis CLUSTER



4.7.3 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Los índices de vegetación son combinaciones de las bandas espectrales registradas por los satélites de teledetección, cuya función es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación, el agua, etc. Se trata de imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales.

El resultado de estas operaciones permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales.

Para este caso, se realizó el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), utilizando como herramienta de procesamiento el software

IDRISI Selva, este índice fue propuesto por Rouse en 1974, es un índice espectral que separa la vegetación verde del suelo utilizando datos digitales del LANDSAT MSS.

Éste se expresa como la diferencia entre las bandas: infrarroja cercana y roja normalizada entre la suma de esas bandas, es decir:

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

donde:

NIR = infrarrojo cercano

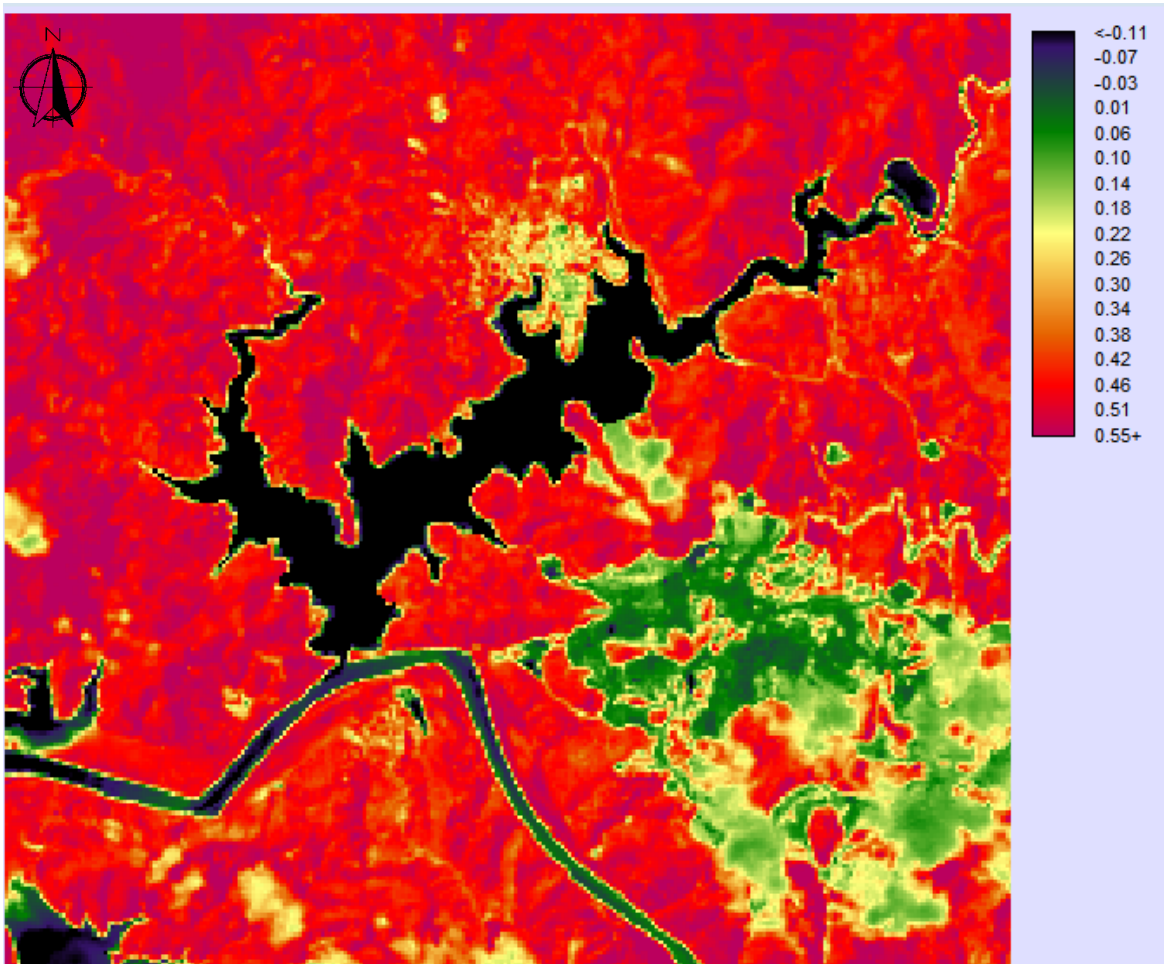
RED = rojo normalizado

La escala de medida oscila entre -1 a 1:

- El agua tiene reflectancia $RED > NIR$, por lo tanto sus valores son negativos en el NDVI.
- Las nubes presentan valores similares de RED y NIR, por lo que su NDVI es cercano a 0.
- El suelo descubierto y con poca vegetación presentan valores positivos aunque no muy elevados.
- Mientras que la vegetación densa, húmeda y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.

El resultado obtenido de esta operación en la zona de estudio se muestra en la imagen 18:

Imagen 18. NDVI en la zona de estudio



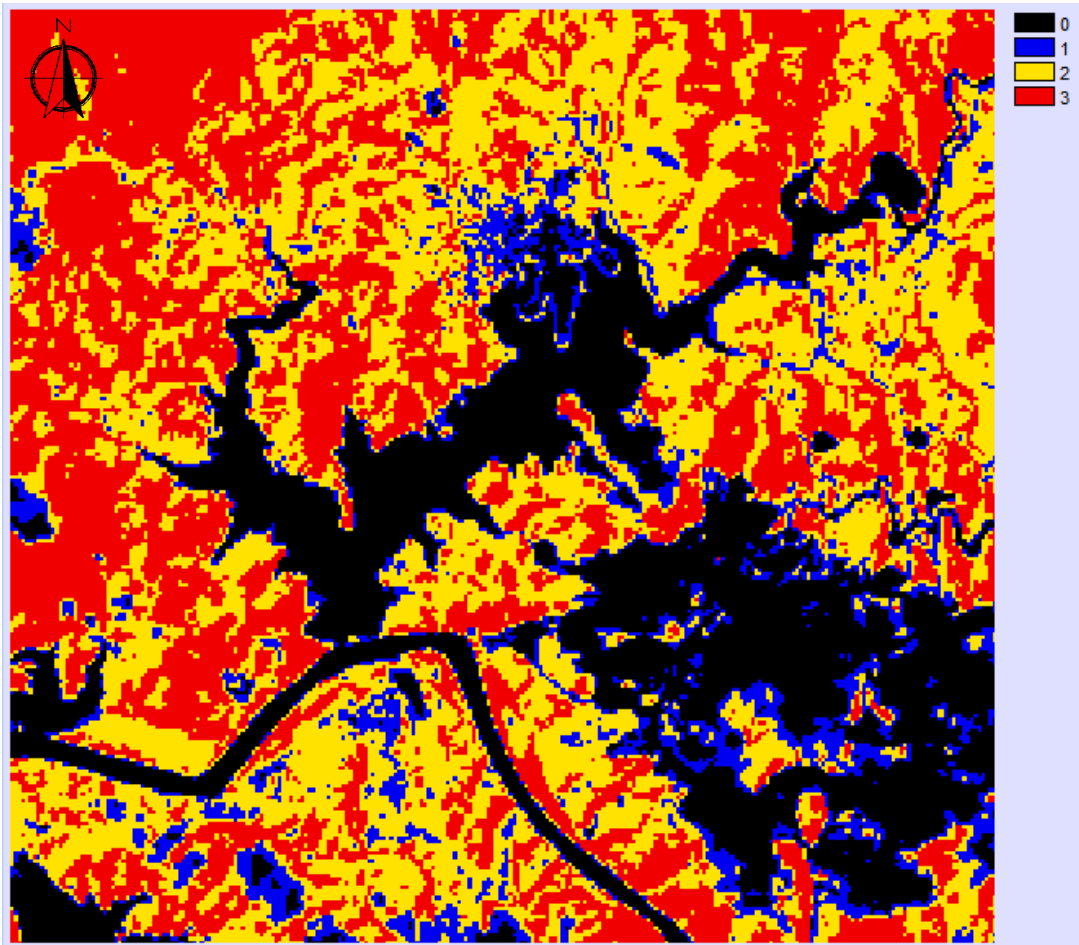
Para tener una mejor visualización de lo que este índice representa en nuestro embalse, se realizó una reclasificación al NDVI agrupando los valores en 4 clases posibles en función de la cantidad de vegetación en la zona:

Tabla 20. Reclasificación del NDVI

Clase	Descripción
0	Sin vegetación
1	Vegetación escasa
2	Vegetación media
3	Vegetación densa

Realizando un ajuste al contraste y cambiando la paleta de despliegue de la imagen para tener una clara definición de estas clases se obtiene la imagen 19:

Imagen 19. Reclasificación del NDVI



5 INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Interpretación de los índices de calidad del agua

Es importante recordar que el índice es una herramienta muy útil en la evaluación de la calidad del recurso hídrico, ya que simplifica la interpretación de los resultados y facilita la comunicación de estos a una audiencia no especializada. El propósito de esta sección es proveer información para los posibles usos del recurso.

5.1.1 Índice de Calidad del Agua (ICA)

Con la tabla 22 se realizará una comparación de los resultados obtenidos del cálculo.

Tabla 21. Resultados del ICA

Identificador	Valor
Punto 1- Muestra 1	57.32
Punto 2- Muestra 2a	59.52
Punto 2- Muestra 2b	59.25
Punto 3- Muestra 3	62.03
Punto 4- Muestra 4	44.88
Punto 5	57.24

Tabla 22. Calificación del agua en función del ICA

ICA		Usos del agua						
Valor	Criterio General	Abastecimiento Público	Recreación General	Pesca y Vida Acuática	Industrial y Agrícola	Navegación	Transporte Desechos Tratados	
100	No contaminado	No requiere purificación	Aceptable para cualquier deporte acuático	Aceptable para todos los organismos	No requiere purificación	Aceptable	Aceptable	
90		Ligera purificación			Ligera purificación			
80	Aceptable	Mayor necesidad de tratamiento	Aceptable pero no recomendable	Excepto especies muy sensibles Dudoso para especies sensibles	Sin tratamiento para la industria	Aceptable	Aceptable	
70	Poco contaminado							
60	Contaminado	Dudoso	Dudoso para el contacto directo	Solo organismos muy resistentes	Con tratamiento en la mayor parte de la industria	Aceptable	Aceptable	
50			Sin contacto con el agua					
40	Altamente Contaminado	Inaceptable	Uso muy restringido	Inaceptable	Uso muy restringido	Restringido	Inaceptable	
30			Inaceptable		Inaceptable	Inaceptable		Inaceptable
20								
10								
0								

Fuente: Evaluación de la calidad del agua mediante técnicas de percepción remota

De manera general el agua del embalse se encuentra entre los rangos de poco contaminado a contaminado.

No sería recomendable para el uso en el abastecimiento público, ya que en el punto 4 es inaceptable según la calificación marcada por el ICA, mientras que en los puntos restantes es dudosa su utilización para este fin y habría la necesidad de un tratamiento.

El uso para la utilización del recurso en actividades de recreación general es dudoso, ya que la calidad del agua no es la adecuada y se recomendaría para todas aquellas que no implicara el contacto directo con el agua.

Con respecto a las actividades de pesca y vida acuática, en general, solo especies muy resistentes podrían sobrevivir en la zona de estudio.

Por otro lado los usos recomendados ante este grado de contaminación presente en el embalse serían: Uso industrial con un tratamiento previo según el ramo de la empresa. Para la navegación y transporte de desechos tratados es aceptable en las existentes condiciones.

5.1.2 ICA IMTA-II UNAM

Asociado al valor numérico del ICA, se definen seis ámbitos de estado de calidad del agua:

- (E) Excelente
- (A) Aceptable
- (LC) Levemente contaminada
- (C) Contaminada
- (FC) Fuertemente contaminada
- (EC) Excesivamente contaminada

Quedando la siguiente clasificación que incluye los criterios generales para su uso:

Tabla 23. Clasificación del ICA IMTA-II UNAM

Ámbito	USO COMO AGUA POTABLE		USO EN PESCA Y VIDA ACUÁTICA		USO EN AGRICULTURA		USO INDUSTRIAL		USO RECREATIVO	
	Rango	Descripción	Rango	Descripción	Rango	Descripción	Rango	Descripción	Rango	Descripción
E	90-100	No requiere purificación para su consumo	70-100	Pesca y vida acuática abundante	90-100	No se requiere purificación para su riego	90-100	No se requiere purificación	70-100	Cualquier tipo de deporte acuático
A	80-90	Purificación menor requerida	60-70	Límite para peces muy sensitivos	70-90	Purificación menor para cultivos que requieran de alta calidad de agua	70-90	Purificación menor para industrias que requieran alta calidad de agua para operación	50-70	Restringir los deportes de inmersión, precaución si se ingiere dada la posibilidad de presencia de bacterias
LC	70-80	Tratamiento potabilizador necesario	50-60	Dudosa la pesca sin riesgos de salud	50-70	Utilizable en la mayoría de los cultivos	50-70	No requiere tratamiento para mayoría de industrias de operación normal	40-50	Dudosa para contacto con el agua
C	50-70	Tratamiento potabilizador necesario	40-50	Vida acuática limitada a especies muy resistentes	30-50	Tratamiento requerido para la mayoría de los cultivos	30-50	Tratamiento para mayoría de usos	30-40	Evitar contacto, sólo con lanchas

Ámbito	USO COMO AGUA POTABLE		USO EN PESCA Y VIDA ACUÁTICA		USO EN AGRICULTURA		USO INDUSTRIAL		USO RECREATIVO	
	Rango	Descripción	Rango	Descripción	Rango	Descripción	Rango	Descripción	Rango	Descripción
FC	40-50	Dudosa para consumo	30-40	Inaceptable para actividad pesquera	20-30	Uso solo en cultivos muy resistente	20-30	Uso restringido en actividades burdas	20-30	Contaminación visible, evitar cercanía
EC	0-40	Inaceptable para consumo	0-30	Inaceptable para vida acuática	0-20	Inaceptable para riego	0-20	Inaceptable para cualquier industria	0-20	Inaceptable para recreación

Cabe recordar que con base en los cálculos realizados, utilizando los resultados de los parámetros dados por el laboratorio, se llegó a los siguientes valores:

Tabla 24. Resultados del ICA IMTA-II UNAM

Identificador	Valor
Punto 1- Muestra 1	47.34
Punto 2- Muestra 2a	51.54
Punto 2- Muestra 2b	50.98
Punto 3- Muestra 3	55.62
Punto 4- Muestra 4	33.39
Punto 5	61.24

Concluyendo que si se quisiera utilizar el agua del embalse como potable, no sería apta debido a que es inaceptable o dudosa para el consumo, por lo que se recomendaría un tratamiento potabilizador. Está afirmación coincide con el análisis del ICA anterior.

También encontramos una similitud con la clasificación dada para el uso del recurso en actividades recreativas, donde el resultado del ICA IMTA-II UNAM arroja que en el punto 3 se debe evitar el contacto, mientras que en los puntos restantes el agua es dudosa para el contacto (punto 1), como se mencionó anteriormente, o se debe restringir los deportes de inmersión debido a que se debe tener precaución si se ingiere, dada la posibilidad de presencia de bacterias (punto 2, punto4, punto 5).

Otra deducción a la que se llegó es que en el punto más contaminado de la zona de estudio (punto 3), la calidad del agua es inaceptable para la vida acuática, sin embargo, al analizar las zonas restantes del embalse, podríamos encontrar especies muy resistentes. Se advierte que realizar actividades pesqueras es dudoso debido a que se podrían generar efectos adversos en la salud de las personas.

El uso del recurso hídrico proveniente de los puntos de muestreo para la agricultura es variable, ya que la clasificación obtenida va desde la indicación de dar un tratamiento para la utilización del agua para la mayoría de los cultivos hasta la instrucción de que es utilizable en la mayoría de estos, por lo que si se desea emplear el agua, se recomienda realizar un estudio específico de su calidad en el punto donde se extraerá el líquido y comparar los resultados de los parámetros con los requeridos para cada tipo de cultivo y dar un tratamiento determinado para que las condiciones del agua sean las adecuadas.

Se concuerda con la conclusión del ICA anterior que para el uso industrial se necesitará o no un tratamiento previo según el ramo de la empresa.

5.1.3 UWQI

Según lo establecido en el artículo *“Development of a water quality index based on a European classification scheme”*, el índice Universal de Calidad del Agua (UWQI), propone un esquema de categorización considerando el tratamiento requerido para transformar agua superficial en agua potable y basado en opiniones de expertos, la clasificación es la siguiente:

Tabla 25. Esquema de categorización del UWQI

Rango de calidad del agua	Valor
Excelente	95-100
Bueno	75-94
Suficiente	50-74
Marginal	25-49
Pobre	0-24

Fuente: Development of a water quality index based on a European classification scheme

Los resultados obtenidos del cálculo son los mostrados en la tabla 26:

Tabla 26. Resultados del UWQI

Identificador	Valor
Punto 1- Muestra 1	51.59
Punto 2- Muestra 2a	51.88
Punto 2- Muestra 2b	48.71
Punto 3- Muestra 3	52.49
Punto 4- Muestra 4	56.44
Punto 5	31.5

Como se puede notar, este índice no realiza una clasificación en función al uso que se le pueda dar al recurso, simplemente involucra parámetros que rigen la calidad global de las aguas superficiales destinadas al uso de agua potable.

Realizando una comparación de los valores obtenidos, se observa que la calidad del agua en los puntos 2 (muestra 2b) y 5 es marginal, mientras que en los puntos 1, 2 (muestra 2a), 3 y 4 es suficiente.

5.2 Integración de mapas

En esta fase del trabajo se integró el modelo de las unidades físico-ambientales, con la clasificación no supervisada de la calidad del agua en el embalse, convirtiendo esta capa raster en vectorial con ayuda de los programas IDRISI 17.0 y QGIS.

Para la interpretación de resultados es importante mencionar que la escala de la capa vectorial de usos de suelo y vegetación (1: 250 000) proporcionada por el portal de geoinformación de CONABIO no es la adecuada para tener información detallada de las actividades económicas de la zona por lo que la influencia antropogénica en el mapa generado (imagen 20) no será notoria en todo el embalse.

A continuación se describen las relaciones encontradas al realizar la superposición de capas:

Es notorio el predominio de los suelos Regosol calcárico y Rendzina alrededor del embalse. La Rendzina ubicada en la mayoría del perímetro excepto al noreste y sureste donde el Regosol calcárico es el suelo influyente.

Este tipo de suelos no son fértiles, debido a que la Rendzina es un tipo de suelo delgado, pedregoso y poco desarrollado que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad, lo que los hace difíciles de trabajar y aumenta su vulnerabilidad a la erosión. Aunado a ello, el calcio que contienen puede inmovilizar los nutrientes minerales, por lo que su uso agrícola es limitado si no se utilizan técnicas apropiadas, por ello, es preferible mantenerlo con la vegetación original. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales).

Los Regosoles calcáricos se caracterizan por tener una capa ócrica¹, que cuando se retira la vegetación, se vuelve dura y costrosa lo que impide la penetración del agua hacia el subsuelo y dificulta el establecimiento de las plantas. Esta combinación (escasa cubierta vegetal y baja infiltración de agua al suelo) favorece la escorrentía superficial, y con ello, la erosión. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales).

¹ Su nombre deriva del vocablo griego "ochros" que significa pálido. Es un horizonte superficial que no presenta una fina estratificación y que es demasiado claro, delgado, con bajo contenido en materia orgánica o que se vuelve masivo y duro en seco.

Al encontrarse el suelo desprotegido facilita el arrastre o filtración de material que podría alterar la calidad del agua, como son sólidos suspendidos y metales pesados.

Es por ello que se recomienda evitar la degradación de suelo y la preservación de la vegetación de la región ya que juegan un papel fundamental en los procesos ecosistémicos, debido a las funciones y servicios que realizan tales como la regulación y la distribución del flujo de agua o como amortiguador de los efectos de diversos contaminantes (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales).

Con la clasificación no supervisada se creó un agrupamiento que asocia pixeles que tienen un patrón de reflexión similar.

Debido al alcance del proyecto, solo se cuenta con información en 5 de las 6 clases generadas, sin embargo, la imagen 20 es útil para la visualización del comportamiento de la calidad del agua a lo largo de la zona de estudio.

A continuación en la tabla 27 se describe el estado del recurso en función a la clasificación para el uso del agua según el ICA y el ICA IMTA-II UNAM asociada a las clases.

Es importante recordar que la clasificación de los ICA es por rangos por lo que a pesar de tener valores diferentes en los resultados de los parámetros las recomendaciones son similares.

Tabla 27. Descripción de la calidad del agua en las clases generadas

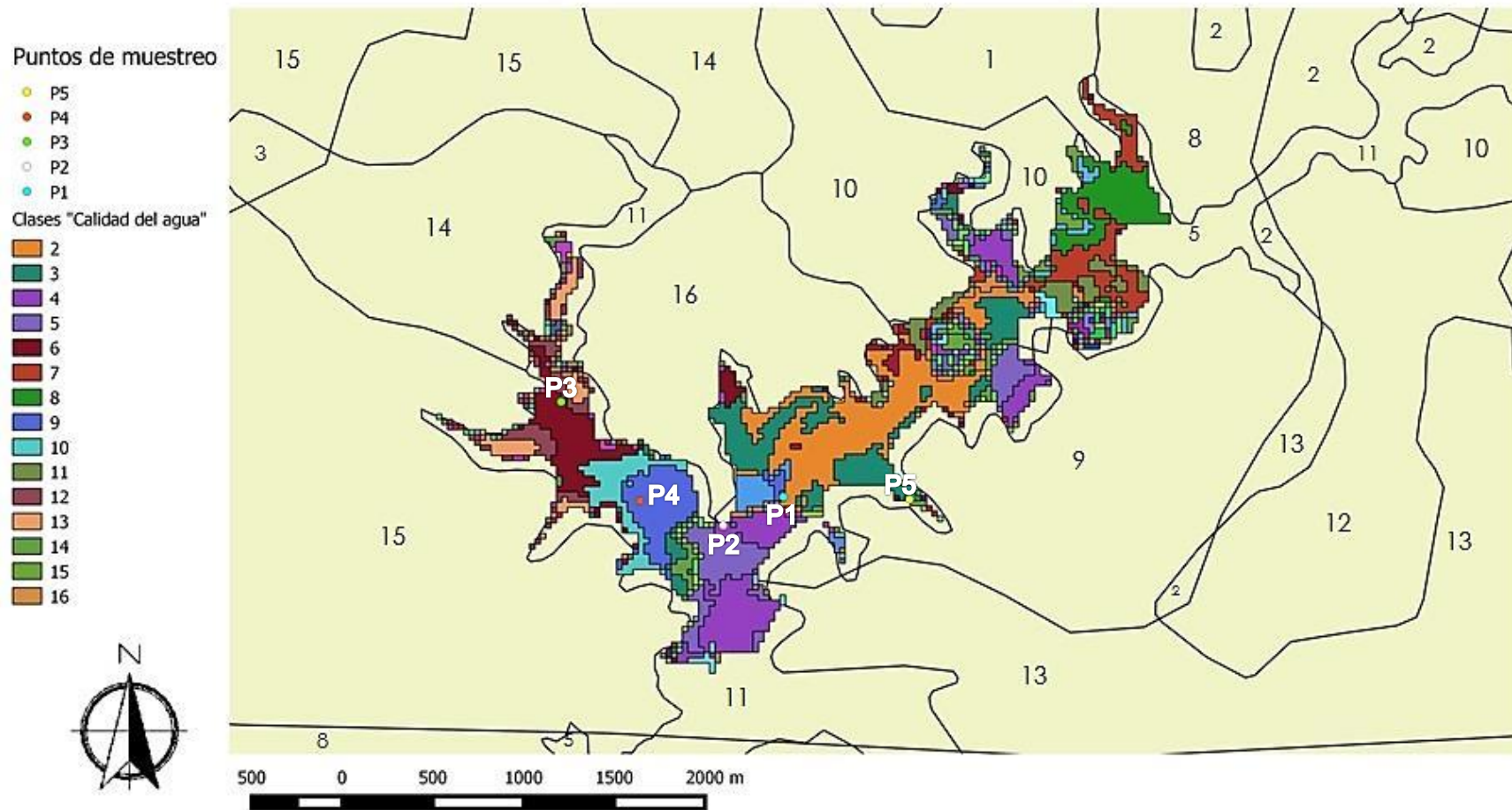
Clase	Descripción
2	Según el criterio general del ICA, esta clase se encontraría contaminada y para su uso en el abastecimiento público sería dudoso, es necesario un tratamiento potabilizador. Para el uso recreativo se advierte que hay una contaminación visible y se debe evitar el contacto directo. En esta clase no encontraríamos vida acuática solo organismos muy resistentes. Si el agua de esta zona se quisiera utilizar en la agricultura solo se podría utilizar en cultivos muy resistentes, para su uso en la industria se requiere de un tratamiento.

Clase	Descripción
3	Presenta valores del ICA muy similares a la clase 2, con la variación de que se puede presentar una mayor cantidad de organismos que en la zona de la clase 2, sin embargo, la vida acuática sigue siendo limitada y para el uso recreativo se debe evitar el contacto directo, solo con lanchas. El uso agrícola, industrial y como agua potable presenta el mismo comportamiento que la clase anterior.
5	Mismas recomendaciones que la clase 2
6	En esta zona según el criterio general del ICA hay poca contaminación. Para uso industrial y agrícola no requiere de un tratamiento, es aceptable para la recreación pero no recomendable. Para el abastecimiento público hay necesidad de un tratamiento.
9	Es la clase más contaminada, es inaceptable para consumo, para la vida acuática, para el riego, para cualquier industria e inaceptable para la recreación.

De manera general al sur y sureste del embalse (imagen 20) se observa una mayor heterogeneidad de clases, esto debido a la influencia de la agricultura de temporal, como se mencionó anteriormente, el tipo de suelo que rodea el cuerpo de agua no es recomendable para esta actividad económica lo que provoca su degradación y el movimiento de material, comprobando que este proceso sí altera la composición de la calidad del recurso hídrico.

Además de la agricultura practicada, se sabe que en esa zona se encuentra la comunidad de Nuevo Balsas factor que se suma para justificar la diversidad de clases en el agua creadas durante la clasificación no supervisada. Se debe realizar una concientización a la comunidad y trabajar con ella para que no se descarguen aguas residuales, ya sean domésticas, urbanas o industriales al embalse. Esta medida tiene como principal propósito reducir la presencia de contaminantes causados por la influencia antropogénica tales como coliformes fecales, nitrógeno, grasas y aceites.

Imagen 20. Unidades físico-ambientales y variación de la calidad del agua en el embalse



Clase	Descripción de unidades (Edafología-Usos de suelo y vegetación)
1	Suelo no clasificado con un uso de suelo de agricultura de temporal anual
2	Suelo no clasificado con un uso de suelo de pastizal inducido
3	Suelo no clasificado con vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia
4	Regosol calcárico con un uso de suelo de agricultura de temporal anual
5	Cuerpo de agua donde el tipo de suelo es regosol calcárico
6	Regosol calcárico con selva baja caducifolia
7	Regosol calcárico con vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia
8	Regosol calcárico con vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino
9	Regosol calcárico con vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia
10	Rendzina con un uso de suelo de agricultura de temporal anual
11	Cuerpo de agua donde el tipo de suelo es rendzina
12	Rendzina con pastizal inducido
13	Rendzina con vegetación arbustiva de selva baja caducifolia
14	Rendzina con vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia
15	Rendzina con vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino
16	Rendzina con vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con relación a los índices de calidad del agua calculados se deduce que estos excluyen información que al no ser considerada, afecta en los resultados ya que varían según los parámetros considerados. Tal es el caso de este estudio, el cual, muestra cambios en la definición del punto más contaminado y aquel que tiene mejores condiciones en sus parámetros para determinado uso.

Los resultados exhiben que para el ICA y el ICA IMTA-II UNAM el punto con menor puntaje en su evaluación fue el P4, mientras el que muestra mejor calidad es el P3 y P5 respectivamente.

Cabe resaltar que estos índices no toman en cuenta metales pesados en su cálculo. El UWQI que sí integra estos parámetros presenta una divergencia en la definición de estos puntos. La zona más contaminada es aquella que se encuentra en el P5.

A partir del análisis de imágenes de Google Earth y de las imágenes satelitales descargadas, se sabe que el punto 5 de muestreo es cercano a una región de minas por lo que la influencia antropogénica de esta actividad económica se ve reflejada al evaluar la presencia de metales en el agua.

Por esta razón, los índices de calidad no se deben de utilizar para caracterizar a detalle el uso del recurso hídrico ya que únicamente nos proporcionan una perspectiva general del estado de contaminación del agua.

Gracias a los diferentes procesos a los que fue sometida la imagen satelital de la zona de estudio, como el NDVI, fue posible conocer el estado de la vegetación y esto a su vez la influencia que tiene sobre otros recursos.

En la imagen 19 se observa que al norte del embalse, la vegetación es más densa por lo que podría ser un factor que influya en la calidad del recurso hídrico, ya que la vegetación ayuda a proteger la calidad del agua mediante la absorción del escurrimiento del agua pluvial, lo que reduce la erosión y permite que los contaminantes sean filtrados antes de llegar al cuerpo receptor.

Mientras que al sur, se muestran regiones (inferior derecha de la imagen 19) en donde no hay vegetación o predomina una vegetación media por lo que se podría suponer que es un sector más susceptible a que su agua tenga niveles de contaminación más elevados.

Al tener una vegetación con una buena cantidad y calidad se presentan beneficios, las afirmaciones anteriores son comprobables al realizar una comparación con los puntos de muestreo. En las cercanías del P5 se observa un sector donde hay nula o poca vegetación, por lo que el suelo se encuentra desprotegido y esto provoca que exista menos infiltración de agua de lluvia y los contaminantes migren al embalse.

Para asegurar la calidad del agua se necesita conservar el suelo y la vegetación ya que son factores que favorecen en la mitigación de los efectos de diversos contaminantes.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Departamento provincial de aguas Río Negro, Argentina. (s.f.). *Índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI)*. Recuperado el 19 de Enero de 2017, de www.dpa.gov.ar/clima/informes/NDVI.pdf
- American Planning Association. (s.f.). *La Vegetación y la Cubierta Vegetal*. Recuperado el 7 de Febrero de 2017, de <https://www.planning.org/planificacion/2/5.htm#a5>
- (s.f.). *Atlas del agua en México 2015*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- Ball, R., & Church, R. (1980). Water quality indexing and scoring. *American Society of Civil Engineers*, vol. 106, 757-771.
- Boyacioglu, H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water SA*, Vol. 33 No. 1.
- Castro, M., Almeida, J., Ferrer, J., & Díaz, D. (2014). Indicadores de la calidad del agua: Evolución y tendencias a nivel global. *Ingeniería Solidaria*, vol. 10, n°17, 111-124.
- CONAGUA. (2005). *Plan para la Gestión Integral del Agua y Recursos Asociados de la Cuenca Valle de Bravo, Estado de México*. CONAGUA.
- CONAGUA. (2015). *Atlas del agua en México 2015*. México, D.F.
- Decenio Internacional para la Acción "El agua fuente de vida" 2005-2015. (s.f.). *Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de Naciones Unidas (ONU-DAES)*. Recuperado el 27 de Enero de 2017, de <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>
- Eastman, R. (2004). *IDRISI Kilimanjaro, Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes*. Worcester, Massachusetts: Clark University.
- Edafología. Ciencias Ambientales*. (s.f.). Recuperado el 8 de Febrero de 2017, de <http://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL8HorDiagHorA.htm>
- Fernández, N., & Solano, F. (2008). *Índices de Calidad y Contaminación del agua*. Pamplona: Universidad de Pamplona.
- Gobierno del estado de Guerrero. (s.f.). *Portal oficial del estado de Guerrero*. Recuperado el 4 de octubre de 2016, de <http://guerrero.gob.mx/municipios/norte/cocula/#prettyPhoto>

- Ibáñez, J. J. (16 de septiembre de 2010). *madrid+d*. Recuperado el 4 de octubre de 2016, de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/09/16/136876>
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010, Cocula Guerrero*.
- Jones, H. G., & A, V. R. (2010). *Remote sensing of vegetation, principles, techniques and applications*. Oxford: Oxford University Press.
- Prat, N. (1998). "Bioindicadores de calidad de las aguas," *Memorias del curso de bioindicadores de Calidad del Agua*. Medellín: Universidad de Antioquia.
- Sacha, A; Espinoza, C. (2011). *Determinación de Contenido Natural e Índices de Calidad: ¿Presente y Futuro de Calidad de Aguas?* Chile: XIV Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS.
- Samboni, N., Carvajal, Y., & Escobar, J. (2007). Parámetros Físicoquímicos como Indicadores de Calidad y Contaminación del agua, Estado del Arte. *Ingeniería e Investigación vol.27*, 172-181.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s.f.). *Suelos. Suelos de México*. Recuperado el 8 de Enero de 2017, de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, C. N. (2012). *Programa de medidas de preventivas y mitigación de la sequía*. México, D.F.
- Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad del agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 79-94.
- UNEP. (2007). *Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report*. Ontario, Canadá.
- Vázquez González , A. B., Sepúlveda Hirose, R. T., & Fuentes, G. V. (2015). *Evaluación de la calidad del agua mediante técnicas de percepción remota*. Ciudad de México: UNAM, Facultad de Ingeniería.