

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA**

**ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES MORFOMÉTRICAS Y DE LAS  
CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA EN SEIS  
MICROCUENCAS AFLUENTES DEL LAGO DE YOJOA EN HONDURAS**

**POR**

**MARÍA RUBÍ ALVARADO HERNÁNDEZ**

**TESIS**



**CATACAMAS**

**OLANCHO, HONDURAS C.A**

**SEPTIEMBRE, 2024**

**ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES MORFOMÉTRICAS Y DE LAS  
CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL AGUA EN SEIS  
MICROCUENCAS AFLUENTES DEL LAGO DE YOJOA EN HONDURAS.**

**POR:**

**MARÍA RUBÍ ALVARADO HERNÁNDEZ**

**JORGE ORBIN CARDONA HERNÁNDEZ**

**Director de tesis**

**Ramon León Canaca Calderón**

**Alexia Paola Velázquez**

**Asesores Auxiliares**

**TESIS**

**PRESENTADO A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE AGRICULTURA  
COMO REQUISITO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA EN GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RECURSOS NATURALES**

**CATACAMAS, OLANCHO**

**HONDURAS C.A**

**SEPTIEMBRE, 2024**

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme la vida para poder cumplir mis metas.

A mi madre por estar a mi lado siempre e inducirme a ser una futura y responsable profesional,  
a mi padre, a mis hermanos que son mi motivación para seguir fortaleciendo mis conocimientos  
y a mi abuelo por estar pendiente de mí.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios que hace todo posible.

A mi familia.

A mis asesores Ing. Ramon Canaca, Dra. Alexia Velásquez por el tiempo que cada día me brindaron.

A mi asesor principal Ing. Jorge Cardona por estar al pendiente de mi anteproyecto, trabajo de campo y redacción final, por brindarme el tiempo necesario para que este trabajo se presente de la mejor manera.

A la Licenciada Ana Mireya Suazo por motivarnos siempre.

A mis compañeros Josué Castillo, Kelin Paz, Ixchel Celeste por estar presentes en cada logro dentro de la universidad.

## Contenido

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....                                              | 2  |
| <b>II. OBJETIVOS</b> .....                                                | 3  |
| 2.1. Objetivo General. ....                                               | 3  |
| 2.2. Objetivos Específicos.....                                           | 3  |
| <b>III. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....                                  | 4  |
| 3.1. Ciclo hidrológico.....                                               | 4  |
| 3.2. Cuencas endorreicas.....                                             | 5  |
| 3.3. Microcuencas .....                                                   | 5  |
| 3.4. Morfometría de las microcuencas .....                                | 6  |
| 3.5. Parámetros generales de una Cuenca Hidrográfica.....                 | 6  |
| 3.5.1. Área .....                                                         | 6  |
| 3.5.2 Perímetro (P) (km).....                                             | 7  |
| 3.5.3 Longitud del curso principal (L) (m).....                           | 7  |
| 3.5.4 Longitud Axial (La) (km) .....                                      | 8  |
| 3.5.5 Ancho de la cuenca (W).....                                         | 8  |
| 3.5.6 Desnivel Altitudinal (DA).....                                      | 8  |
| 3.6 Parámetros de forma.....                                              | 9  |
| 3.6.1 Coeficiente de Compacidad o Gravelius (Kc).....                     | 9  |
| 3.6.2 Factor Forma de Horton (Rf) .....                                   | 10 |
| 3.6.3 Índice de Alargamiento (Ia) .....                                   | 11 |
| 3.7 Parámetros de Relieve.....                                            | 12 |
| 3.7.1 Pendiente media de la cuenca (J) (%) .....                          | 12 |
| 3.7.2 Curva Hipsométrica .....                                            | 13 |
| 3.7.3 Histograma de frecuencias altimétricas .....                        | 14 |
| 3.8 Caracterización de la Red de Drenaje.....                             | 14 |
| 3.8.1 Densidad de Drenaje.....                                            | 14 |
| 3.8.2 Tiempo de concentración .....                                       | 15 |
| 3.8.3. Longitud de Todos los Causas (km) .....                            | 16 |
| 3.8.4. Orden de la Corriente .....                                        | 16 |
| 3.8.5. Coeficiente de Torrencialidad .....                                | 16 |
| 3.9 Caracterización fisicoquímica del agua en las seis microcuencas ..... | 17 |
| 3.9.1 pH .....                                                            | 18 |
| 3.9.2 Temperatura .....                                                   | 19 |
| 3.9.3 Conductividad eléctrica .....                                       | 19 |

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.9.4 Solidos disueltos Totales SDT .....                                                  | 20        |
| 3.9.5 Oxigeno Disueltos (LDO) .....                                                        | 21        |
| <b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>                                                       | <b>22</b> |
| 4.1 Descripción del sitio de estudio.....                                                  | 22        |
| 4.1.1 Geomorfología.....                                                                   | 22        |
| 4.1.2 Topografía, geología y suelos.....                                                   | 23        |
| 4.1.3 Clima .....                                                                          | 23        |
| 4.2 Mapa de ubicación.....                                                                 | 25        |
| 4.3 Red hídrica.....                                                                       | 26        |
| 4.4 Materiales y equipo .....                                                              | 26        |
| 4.5 Método.....                                                                            | 27        |
| 4.5. Análisis de las condiciones morfométricas y de las características fisicoquímicas ... | 27        |
| 4.5.1 Parámetros de forma.....                                                             | 27        |
| 4.5.2. Parámetros de relieve .....                                                         | 28        |
| 4.5.3 Parámetros para la Red de Drenaje.....                                               | 28        |
| 4.6. Fisicoquímica: .....                                                                  | 28        |
| <b>V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>                                                     | <b>30</b> |
| 5.1. Morfometría de las microcuencas .....                                                 | 30        |
| 5.1.2 Morfometría del relieve de las microcuencas .....                                    | 31        |
| 5.1.3 Curvas Hipsométricas e histogramas de frecuencia altimétrica .....                   | 32        |
| 5.1.4 Parámetros de Red de drenaje de las microcuencas .....                               | 34        |
| 5.2 Características fisicoquímicas del agua en las microcuencas durante la época seca.     | 36        |
| 5.2.1 pH .....                                                                             | 37        |
| 5.2.2 Temperatura .....                                                                    | 38        |
| 5.2.3 Conductividad Eléctrica.....                                                         | 39        |
| 5.2.4 Solidos disueltos totales .....                                                      | 41        |
| 5.2.5 Oxígeno Disuelto.....                                                                | 42        |
| 5.2.6 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales.....                             | 43        |
| <b>VI. CONCLUSIONES.....</b>                                                               | <b>45</b> |
| <b>VII. RECOMENDACIONES .....</b>                                                          | <b>46</b> |
| <b>VIII. REVISION BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                   | <b>47</b> |
| <b>IX. ANEXOS.....</b>                                                                     | <b>52</b> |

## Lista de Tablas

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Representación de área .....                                                           | 7  |
| Tabla 2. Clasificación del Coeficiente de Compacidad o Gravelius .....                          | 10 |
| Tabla 3. Relación forma Horton .....                                                            | 11 |
| Tabla 4. Clasificación del índice de alargamiento .....                                         | 12 |
| Tabla 5. Clasificación del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente.....                 | 13 |
| Tabla 6. Factores de densidad de drenaje de cuencas según Strahler/ Horton .....                | 15 |
| Tabla 7. Morfometría asociada a la forma de las microcuencas tributarias del Lago de Yojoa..... | 30 |
| Tabla 8. Parámetros de forma de las microcuencas.....                                           | 31 |
| Tabla 9. Morfometría asociada al relieve .....                                                  | 31 |
| Tabla 10. Parámetros asociados a la red de drenaje. ....                                        | 35 |

## Lista de figuras

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Tipo de Curva hipsométrica .....                                        | 14 |
| Figura 2 .Mapa de ubicación .....                                                 | 25 |
| Figura 3.Red hídrica de las seis microcuencas de estudio .....                    | 26 |
| Figura 4.Representación de Curvas Hipsométricas e Histogramas Altitudinales ..... | 32 |
| Figura 6 Valoración de pH en seis ríos .....                                      | 37 |
| Figura 7. Valoración de temperatura.....                                          | 38 |
| Figura 8. Valoración de conductividad $\mu\text{s}/\text{cm}$ .....               | 40 |
| Figura 9.Valoracion de Sólidos Disueltos Totales .....                            | 41 |
| Figura 10.Valoracion de Oxígeno Disuelto.....                                     | 42 |
| Figura 11. Comparación de Conductividad y Sólidos Disueltos Totales.....          | 43 |

## **Lista de ilustraciones**

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Ilustración 1.Toma de datos con sonda HYDROLAB ..... | 29 |
| Ilustración 2.Toma de datos con pHmetro .....        | 29 |

## **RESUMEN**

La siguiente investigación se centra en el análisis morfométrico y fisicoquímico de seis microcuencas afluentes del Lago de Yojoa, Honduras. Enfocándose en comprender la dinámica hidrológica y los procesos geomorfológicos que influyen en la calidad del agua y en la respuesta de cada una de las microcuencas.

La investigación de carácter cuantitativo utilizó herramientas de georreferenciación (QGIS) para analizar modelos de elevación digital (DEM) y capas vectoriales que representan la red de drenaje de las microcuencas. Se calcularon parámetros morfométricos clave y se realizaron mediciones semanales de parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT) en diferentes puntos de las microcuencas durante la época seca.

El análisis reveló una variabilidad significativa en las características morfométricas y fisicoquímicas entre las microcuencas. Microcuencas como Raíces y Quebradona mostraron altos valores de conductividad eléctrica, sugiriendo una mayor mineralización y posible influencia antrópica. Por otro lado, microcuencas como Yure y Monteverde presentaron valores más bajos de SDT, lo que indica una menor carga de contaminantes disueltos.

Las características morfométricas y fisicoquímicas de las microcuencas afluentes al Lago de Yojoa juegan un papel crucial en la dinámica hidrológica y sedimentaria de la región. La variabilidad observada refleja la influencia combinada de la geomorfología y las actividades humanas, impactando directamente en la salud ecológica y sostenibilidad del lago.

## **Palabras clave**

Escorrentía, Infiltración, Erosión, Sedimentación, Variabilidad térmica, Actividades antrópicas

## **I. INTRODUCCIÓN**

Las microcuencas hidrográficas son unidades fundamentales en el estudio de los recursos hídricos y su gestión sostenible. Su análisis morfométrico, que incluye la evaluación de parámetros como la forma, el tamaño, la pendiente y la red de drenaje, permite comprender mejor la dinámica hidrológica y los procesos geomorfológicos que ocurren en estas áreas (Strahler, 1957). La morfometría de las microcuencas no solo influye en el comportamiento hidrológico, sino también en la distribución y calidad del agua, aspectos cruciales para el desarrollo de estrategias de manejo y conservación (Horton, 1945).

Paralelamente, el estudio de las características fisicoquímicas del agua en las microcuencas ofrece una visión detallada de su calidad y de los procesos biogeoquímicos que tienen lugar en el entorno acuático. Parámetros como el pH, la conductividad eléctrica, la temperatura, y la concentración de nutrientes y contaminantes, son indicadores esenciales para evaluar el estado de salud de los cuerpos de agua y para detectar posibles impactos antropogénicos (Chapman, 1996).

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivos realizar un análisis exhaustivo de la morfometría de seis microcuencas tributarias del Lago de Yojoa en Honduras, caracterizar sus aguas desde el punto de vista fisicoquímico durante el periodo de época seca del año 2024. Este enfoque integral permitió una comprensión profunda de la relación entre la morfología del terreno, la calidad del agua y los procesos geohidrológicos, proporcionando información valiosa para la gestión y protección de los recursos hídricos en la región de estudio.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1.Objetivo General.**

- Analizar las condiciones morfométricas relacionadas con el relieve, la forma y la red de drenaje, así como las características fisicoquímicas del agua en seis microcuencas principales tributarias del lago de Yojoa, Honduras.

### **2.2.Objetivos Específicos.**

- Determinar las características morfométricas de las microcuencas de interés para el estudio.
- Identificar las características fisicoquímicas del agua predominantes en las microcuencas durante la época seca.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

Los lagos son cuerpos de agua superficial relativamente aislados y con tiempos de retención largos. Consecuentemente el *Espacio Lacustre* es un espacio de poca renovación en cuanto a entradas y salidas, de materiales, de energía, de actividades, etc (Periman, 2008).

#### 3.1. Ciclo hidrológico.

En el caso de los cuerpos de agua lacustres, estos desempeñan un papel importante en el ciclo hidrológico. Los lagos son una fuente de agua dulce y funcionan como almacenamiento de agua en la hidrósfera. Durante la evaporación, el agua de los lagos se convierte en vapor de agua y se eleva a la atmósfera, donde se condensa para formar nubes. Estas nubes luego se desplazan y pueden precipitar en forma de lluvia o nieve sobre el cuerpo de agua lacustre, reabasteciéndolo y manteniendo su nivel de agua (Paz *et al.* 2014).

Además, los lagos también pueden recibir agua de otras fuentes, como los ríos que desembocan en ellos o el agua subterránea que se alimenta de los acuíferos cercanos. Por otro lado, los lagos también pueden contribuir a la recarga de agua subterránea, ya que parte del agua que se deposita en ellos puede infiltrarse en el subsuelo y alimentar los acuíferos (Gálvez y Riveros, 2012).

Es importante mencionar que la vinculación del ciclo hidrológico con los cuerpos de agua lacustres no solo abarca los procesos físicos y químicos del agua, sino también tiene un impacto en la calidad del agua. Los lagos son ecosistemas complejos y delicados, y la calidad del agua puede influir en la salud de las comunidades acuáticas y terrestres que dependen de ellos. Por lo tanto, es crucial mantener una gestión

adecuada de los lagos para preservar su calidad y funciones dentro del ciclo hidrológico (Periman, 2008).

### **3.2. Cuencas endorreicas**

Una cuenca endorreica es un área en la que el agua no tiene salida fluvial hacia el océano. Las precipitaciones que caen en una cuenca endorreica permanecen allí, y solo **desaparecen** por infiltración o evaporación. Las cuencas endorreicas se caracterizan por ser sistemas cerrados, es decir, no tienen salida a ningún océano o mar. El agua que se acumula en estas cuencas proviene principalmente de la precipitación y de fuentes subterráneas. Estas cuencas son importantes ya que cualquier cambio en el balance de agua puede tener un impacto significativo en todo el sistema hidrológico de la región (Madrid, 2022).

### **3.3. Microcuencas**

De acuerdo con FAO (2011) las microcuencas “Son el área de escurrimiento superficial de corrientes menores hacia un tributario mayor. Las microcuencas, por otro lado, son cuencas más pequeñas que están contenidas dentro de las cuencas endorreicas. Son sistemas hidrográficos a menor escala, con su propia red de drenaje y un área de drenaje limitada. Las microcuencas contribuyen a la recarga de los cuerpos de agua lacustres a través del escurrimiento superficial y la infiltración del agua en el suelo (CEPAL, 2013).

La recarga de los cuerpos de agua lacustres en las cuencas endorreicas puede ocurrir de diferentes formas. La precipitación que cae directamente sobre el lago es una fuente importante de recarga, y también puede provenir de las aguas de los ríos y arroyos que drenan hacia el lago desde las microcuencas circundantes. En cuanto a las salidas en las cuencas endorreicas, al no tener conexión directa con el océano, la evaporación es una de las formas más comunes de pérdida de agua (Sánchez, 2023).

El balance hídrico se refiere a la relación entre las entradas y las salidas de agua en un sistema hidrológico. Un adecuado balance hídrico en estas cuencas permite evaluar y gestionar la disponibilidad de agua, ya que ayuda a identificar las entradas de agua (precipitación, escurrimiento superficial, infiltración) y las salidas (evaporación, escurrimiento superficial, infiltración hacia los acuíferos). Además, también puede ayudar a prevenir problemas de inundaciones o sequías, al permitir una mejor planificación y gestión de los recursos hídricos en la región (Ferrera, 2023).

### **3.4. Morfometría de las microcuencas**

La morfometría o geo morfometría es el análisis cuantitativo de la superficie terrestre de una cuenca hidrográfica (Quesada & Barrantes, 2017). La caracterización está dirigida fundamentalmente a cuantificar las diferentes variables que tipifican a la cuenca con el fin de establecer la vocación, posibilidades y limitaciones de sus recursos naturales y el ambiente, así como las condiciones socioeconómicas de las comunidades que la habitan (Zambrana, 2008).

El análisis morfométrico permite conocer las características físicas de una cuenca mediante el estudio de las particularidades de superficie, relieve e hidrografía, que realiza comparaciones con otras cuencas, y ayuda a entender la complejidad de su comportamiento hidrológico (Lombaida, 2020).

### **3.5. Parámetros generales de una Cuenca Hidrográfica**

#### **3.5.1. Área**

El área de la cuenca es probablemente la característica morfométrica e hidrológica más importante. Está definida por la divisoria de aguas, que permite definir el tamaño, expresado en km<sup>2</sup> (Lombaida, 2020).

Tabla 1. Representación de área

| ÁREA (km <sup>2</sup> ) | NOMBRE      |
|-------------------------|-------------|
| < 5                     | Unidad      |
| 5 – 20                  | Sector      |
| 20 – 100                | Microcuenca |
| 100 – 300               | Subcuenca   |
| > 300                   | Cuenca      |

Fuente: Lombaida, 2020

### 3.5.2 Perímetro (P) (km)

El cálculo del perímetro de una cuenca es fundamental en hidrología y gestión de recursos hídricos, ya que proporciona información sobre la extensión del área de drenaje y su relación con las características topográficas circundantes. En términos de análisis hidrológico y modelado de cuencas, el perímetro es una medida clave para entender la forma y las características geomorfológicas de la cuenca, lo que puede influir en los patrones de flujo de agua y la respuesta a las precipitaciones. También se entiende como la longitud de la divisoria topográfica. Se mide a partir del punto de salida de la cuenca o punto de interés en el cauce. (Ricca & Robles, 2014).

### 3.5.3 Longitud del curso principal (L) (m)

La longitud de la cuenca se define como la longitud de su cauce principal, que es la distancia que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba. La longitud de la cuenca puede considerarse según tres criterios diferentes: la longitud del cauce principal considerando su sinuosidad, la longitud del cauce principal considerando el eje del mismo, o la distancia en línea recta entre el punto de control de la cuenca y el punto más alejado de este. Es la longitud del río desde el punto más distante de la cuenca hasta la desembocadura. (Gaspari *et al.*, 2015).

#### 3.5.4 Longitud Axial (La) (km)

La longitud axial de una cuenca es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca. Es la longitud de la línea recta que conecta los puntos extremos de la cuenca en forma aproximadamente paralela al curso principal. La longitud axial de la cuenca se mide siguiendo el curso del agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante en la cuenca. (Tacusi & Hacha, 2015).

#### 3.5.5 Ancho de la cuenca (W)

El ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud axial de la cuenca (La) (Tacusi & Hacha, 2015), es calculada con la siguiente ecuación

$$W = \frac{A}{La} \quad 1.$$

Donde:

A: Superficie de la cuenca (km<sup>2</sup>)

La: longitud axial de la cuenca (km)

#### 3.5.6 Desnivel Altitudinal (DA)

En el ámbito de los recursos hídricos, el desnivel altitudinal es crucial para entender el flujo de agua. La diferencia de altitud entre dos puntos afecta la velocidad y dirección del agua, lo que es esencial para modelar ríos, arroyos y otros cuerpos de agua.

Es el valor de la diferencia entre la cota más alta y la más baja de la cuenca. (Carvallo & Delgado, citado por Lombaida, 2020)

$$DA = HM - Hm \quad 2.$$

Donde:

DA = Desnivel altitudinal

HM: Cota Máxima (msnm)

Hm: Cota mínima (msnm)

### 3.6 Parámetros de forma

La forma de la cuenca es determinante para entender su comportamiento hidrológico. Cuencas con la misma área, pero de diferentes formas presentan respuestas hidrológicas e hidrogramas diferentes (Chester *et al.*, 2017). Los parámetros de forma tomados en cuenta son:

#### 3.6.1 Coeficiente de Compacidad o Gravelius (Kc)

Define la forma y la superficie que abarca la cuenca, teniendo influencia sobre la escorrentía directa y, por tanto, en la marcha y geometría del hidrograma resultante de una precipitación (Flores 2011; Ortiz 2016). Este parámetro es adimensional y relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo teórico de área equivalente al de la cuenca (Camino *et al.*, 2018)

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad 3.$$

Donde:

Kc: Índice de Gravelius (adimensional)

P: Perímetro de la cuenca (km)

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

*Tabla 2. Clasificación del Coeficiente de Compacidad o Gravelius*

| Kc         | Clasificación                | Interpretación Ambiental            |
|------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 1 a 1.25   | Casi redonda a oval-redonda  | Alta tendencia a inundaciones       |
| 1.25 a 1.5 | Oval redonda a oval-alargada | Mediana tendencia a inundaciones    |
| 1.5 a 1.75 | Oval alargada a alargada     | Baja tendencia a la inundación      |
| > 1.75     | Alargada                     | Cuencas propensas a la conservación |

Fuente: modificado de Lombaida, 2020

### 3.6.2 Factor Forma de Horton (Rf)

El factor de Horton es una medida que se utiliza en hidrología para estimar la magnitud de la escorrentía superficial en función de las características del suelo y de las precipitaciones. Fue propuesto por el hidrólogo Robert E. Horton y es parte del modelo de escorrentía propuesto por él. Es importante porque proporciona información sobre cómo el agua se mueve sobre la superficie del suelo en respuesta a la lluvia y cómo este proceso afecta a la erosión y la escorrentía.

El factor de forma de Horton relaciona el área de la cuenca (A), y el cuadrado de la longitud máxima o longitud axial de la misma (La) (Ramírez *et al.* 2015).

Donde:

$$Rf = \frac{A}{La^2} \quad 4.$$

*Rf*: Factor forma de Horton (adimensional)

*A*: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

*La*: Longitud axial de la cuenca (km)

Tabla 3. Relación forma Horton

| Rango de Valores | Forma de la Cuenca        |
|------------------|---------------------------|
| < 0.22           | Muy Alargada              |
| 0.22 – 0.30      | Alargada                  |
| 0.3 – 0.37       | Ligeramente alargada      |
| 0.37 – 0.45      | Ni alargada ni ensanchada |
| 0.45 – 0.60      | Ligeramente ensanchada    |
| 0.60 – 0.80      | Ensanchada                |
| 0.80 – 1.12      | Muy Ensanchada            |
| > 1.20           | Rodeando el desagüe       |

Fuente: Lombaida, 2020

### 3.6.3 Índice de Alargamiento ( $I_a$ )

En estudios hidrológicos, la forma alargada de una cuenca hidrográfica puede afectar el comportamiento de la escorrentía y la distribución espacial de la precipitación, lo que es crucial para la gestión de recursos hídricos. Este índice, propuesto por Horton, relaciona la longitud máxima de la cuenca con su ancho máximo medio que es perpendicular a la dimensión anterior (Baldeon *et al.*, 2016).

Donde:

$$I_a = \frac{L_a}{W} \quad 5.$$

$I_a$ : Índice de Alargamiento (adimensional)

$W$ : Ancho de la cuenca (km)

$L_a$ : Longitud axial de la cuenca (km)

*Tabla 4. Clasificación del índice de alargamiento*

| Rangos de $I_a$ | Clases de alargamiento |
|-----------------|------------------------|
| 0 – 1.4         | Poco alargada          |
| 1.5 – 2.8       | Moderadamente alargada |
| > 2.9           | Muy Alargada           |

Fuente: Lombaida, 2020

### 3.7 Parámetros de Relieve

Los parámetros de relieve son de gran importancia puesto que tienen más influencia que los parámetros de forma sobre la respuesta hidrológica; con carácter general podemos decir que a mayor relieve o pendiente la generación de escorrentía se produce en lapsos de tiempo menores (Alcántara *et al.*, 2010).

#### 3.7.1 Pendiente media de la cuenca (J) (%)

Es la media ponderada para toda la cuenca, la cual depende de la configuración topográfica del terreno y el área de la cuenca. Para su determinación existen distintos criterios. Para calcular la pendiente media de una cuenca en QGIS®, primero carga el Modelo Digital de Elevación (DEM) y la capa vectorial de la cuenca. Luego, genera la capa de pendiente utilizando la herramienta "Análisis de Terreno > Pendiente" en el menú "Raster". A continuación, recorta la capa de pendiente utilizando la cuenca como máscara a través de "Extracción > Recortar por capa de máscara". Finalmente, utiliza "Estadísticas Zonales" para calcular la pendiente media seleccionando la capa recortada de pendiente como entrada y la capa de la cuenca como la zona de análisis, lo que te permitirá obtener la pendiente media directamente en la tabla de atributos de la cuenca.

*Tabla 5. Clasificación del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente.*

| Rangos de Pendiente (%) | Descripción                                    |
|-------------------------|------------------------------------------------|
| 00 – 4                  | Nula o casi Nivel                              |
| 4 – 8                   | Ligeramente inclinada                          |
| 8 – 15                  | Ligeramente inclinada a moderadamente empinada |
| 15 – 25                 | Moderadamente empinada                         |
| 25 – 50                 | Empinada                                       |
| 50 – 75                 | Muy empinada                                   |
| > 75                    | Extremadamente empinada                        |

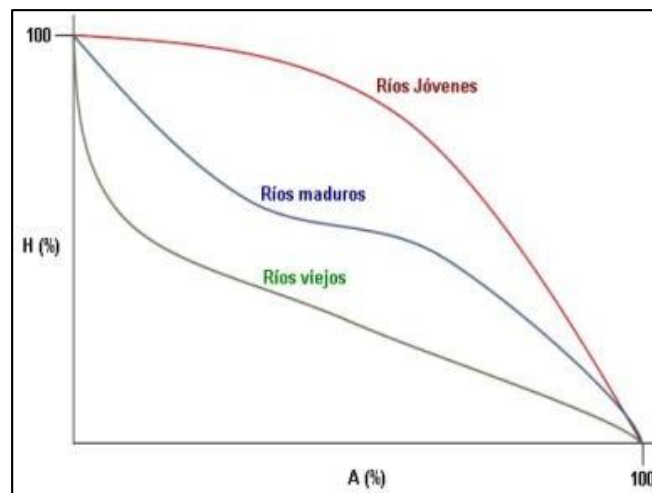
Fuente: Lombaida, 2020

### 3.7.2 Curva Hipsométrica

Representa gráficamente la variación de altitud que se presenta en una cuenca y se obtiene a partir de un plano topográfico, tomando los valores del área en porcentaje que están por debajo de una determinada altura (Illescas, 2016; Zabala, 2016).

En las cuencas pueden presentarse diferentes tipos de curva hipsométrica debido a su evolución (edad del río), que permite definir características fisiográficas:

- Cuencas con ríos jóvenes: presentan gran potencial erosivo.
- Cuencas con ríos maduros: se encuentran en estado de equilibrio.
- Cuencas con ríos viejos: son sedimentarias (Aguilar & Naranjo, 2018).



*Figura 1.* Tipo de Curva hipsométrica

### 3.7.3 Histograma de frecuencias altimétricas

Es la representación de la superficie, en  $\text{km}^2$  o en porcentaje, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. De esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras contiene la misma información de la curva hipsométrica, pero con una representación diferente, obteniendo una idea de la variación altitudinal en una cuenca. (Camones, 2018; A. Gutiérrez, 2007; Torres & Téllez, 2016).

## 3.8 Caracterización de la Red de Drenaje

Estos parámetros representan el sistema de jerarquía de los cauces, que va desde los pequeños surcos hasta los ríos, que al confluir unos con otros se forma un colector principal de toda la cuenca (Demetrio, 2016).

### 3.8.1 Densidad de Drenaje

La densidad de drenaje permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema hidrográfico. En general, un valor mayor de la densidad de drenaje refleja una mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor

potencial de erosión (Ricce & Robles 2014). Consiste en relacionar la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan en la cuenca con respecto al área total de la misma (Cruz *et al.*, 2015).

Donde:

$$Dd = \frac{L}{A} \quad 6.$$

$L$ :  $\Sigma$  Longitud de las corrientes efímeras, intermitentes y perennes de la cuenca en km.

$A$ : Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

*Tabla 6. Factores de densidad de drenaje de cuencas según Strahler/ Horton*

| Densidad de Drenaje<br>(km/km <sup>2</sup> ) | Categoría | Interpretación Ambiental                        |
|----------------------------------------------|-----------|-------------------------------------------------|
| < 1                                          | Baja      | Baja la escorrentía y aumenta la infiltración   |
| 1 – 2                                        | Moderada  | Tendencia media de escorrentía                  |
| 2 – 3                                        | Alta      | Alta tendencia a fluir y a las inundaciones     |
| > 3                                          | Muy Alta  | Alta tendencia a la escorrentía, y a la erosión |

Fuente: ( Lombaida 2020 )

### 3.8.2 Tiempo de concentración

Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante se valora mediante los siguientes métodos (Bedient & Huber, 2002).

#### Método de Clark

$$tc = 0.335 * \left(\frac{A}{S^{0.5}}\right)^{0.593} \quad 7$$

Donde

Tc: Tiempo de concentración

A: Área de la cuenca

S: Pendiente

### **3.8.3. Longitud de Todos los Causas (km)**

La longitud de todos los causas es la suma total de la longitud de todos los cauces (primarios, secundarios y terciarios) dentro de una microcuenca. Este parámetro proporciona una medida de la densidad y ramificación de la red de drenaje (Dunne & Leopold, 1978).

### **3.8.4. Orden de la Corriente**

El orden de la corriente es un sistema de clasificación de los cauces en una red de drenaje, que asigna un número a cada cauce basado en su posición en la jerarquía de la red. El sistema más comúnmente utilizado es el de Strahler, donde los cauces de primer orden no tienen tributarios, y el orden aumenta a medida que los cauces se juntan (Strahler, 1957).

### **3.8.5. Coeficiente de Torrencialidad**

Capacidad de un curso de agua o una cuenca hidrográfica para generar flujos torrenciales, es decir, flujos rápidos y potencialmente destructivos. Este coeficiente se calcula generalmente como la relación entre la pendiente del cauce principal y la longitud del mismo, y puede incluir otros factores como la velocidad del flujo y la pendiente de la cuenca en su conjunto.

Un coeficiente de torrencialidad bajo indica que la cuenca tiene una baja capacidad para generar flujos torrenciales. Esto se asocia típicamente con cuencas que presentan pendientes suaves, longitudes de cauce principal largas y una morfología que facilita la dispersión del flujo de agua. Estas características permiten que el agua se distribuya de manera más uniforme, reduciendo la velocidad y el volumen del flujo torrencial. En general, valores menores a 0.05 se consideran bajos, lo que refleja un sistema hidrológico menos propenso a generar inundaciones repentinas (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

Cuencas con un coeficiente de torrencialidad medio tienen una capacidad moderada para generar flujos torrenciales. Valores entre 0.05 y 0.08, indican un equilibrio entre la capacidad del terreno para absorber el agua y la propensión a generar flujos rápidos. Estas cuencas requieren una gestión cuidadosa, ya que pueden generar torrentes moderadamente intensos durante eventos de precipitación significativos (Rodríguez, Martínez, & Gómez, 2018).

Un coeficiente de torrencialidad alto sugiere una alta capacidad para generar flujos torrenciales, que son flujos rápidos y con una alta energía erosiva. Este tipo de cuencas se caracteriza por pendientes pronunciadas y cauces cortos, lo que facilita la rápida acumulación y descarga de agua. Los valores superiores a 0.08 indican un alto riesgo de torrencialidad, lo que hace que estas áreas sean más susceptibles a inundaciones y otros eventos hidrológicos extremos. La planificación y manejo de estas cuencas son cruciales para mitigar los riesgos asociados (Smith, 2015).

### **3.9 Caracterización fisicoquímica del agua en las seis microcuencas**

La fisicoquímica del agua se refiere al estudio de las propiedades físicas y químicas del agua, incluyendo su estructura molecular, comportamientos en diferentes estados, interacciones con otros compuestos, y los principios termodinámicos y cinéticos que gobiernan estas propiedades. Este campo abarca temas como la disolución de gases y sólidos en agua, la conductividad eléctrica, el pH, temperatura entre otros aspectos. La comprensión de la fisicoquímica del agua es esencial en diversas disciplinas, desde la química ambiental y la ingeniería hasta la biología y la geología, ya que el agua es un

solvente universal y un medio vital para innumerables reacciones y procesos naturales y artificiales (Smith, 2015; Garcia, 2019).

### 3.9.1 pH

Es una medida de la concentración de iones hidrógeno ( $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ ). La concentración de iones hidrógeno ( $[\text{H}^+]$ ) interviene en los equilibrios de distintas sustancias que pueden encontrarse en diferentes formas de acuerdo a la acidez, por ejemplo en la solubilidad de los metales. El intervalo de pH adecuado para la vida es muy estrecho y crítico, cualquier variación fuera de este intervalo puede ser fatal para los organismos. En aguas naturales se encuentra en un rango comprendido entre 6 y 9 (Stumm y Morgan, 1995; Conzonno, 2012; Tundisi y Tundisi, 2013).

La fuerza de un ácido está determinada por su anión; anión fuerte (sulfúrico, clorhídrico) anión débil (carbonato, bicarbonato) y todos tienen el mismo catión ( $\text{H}^+$ ). Lo mismo ocurre con las bases. Cuando se une un anión (ácido) fuerte con un catión (base) fuerte, la sal resultante es neutra, ya que la acidez y basicidad están compensadas. Cuando se une un anión (ácido) fuerte, con un catión (base) débil, la sal resultante será ácida. Cuando se une un anión (ácido) débil con un catión (base) fuerte, la sal resultante será básica.

Sin embargo, la medición del pH se emplea para expresar la intensidad de la acidez, la basicidad o la alcalinidad. El pH no indica la cantidad de compuestos ácidos o alcalinos en el agua, sino la fuerza que éstos tienen.

- Con pH 0-7 el agua es ácida, y lleva ácidos libres o sales ácidas.
- Con pH = 7 el agua es neutra, no tiene ni sales ácidas ni sales básicas; sólo contiene sales neutras.
- Con pH 7-14 el agua es básica o alcalina y lleva sales básicas. Cada cambio de una unidad de pH multiplica por 10 la fuerza de acidez o alcalinidad de dicha agua: así, un agua con pH 6 es 10 veces más ácida que un agua con pH 7 (Adiveter, 2013).

### 3.9.2 Temperatura

La variación de temperatura afecta a magnitudes físicas como la solubilidad de los gases en agua, la densidad, viscosidad, tensión superficial, presión de vapor, etc., y también afecta la estabilidad de las proteínas celulares porque induce cambios conformacionales que alteran la actividad biológica de estos compuestos. Desde el punto de vista biológico, la temperatura del ambiente influye extraordinariamente en el desarrollo de los organismos que se encuentran en el seno del agua. Una temperatura elevada implica la aceleración de la putrefacción y por tanto del aumento de la demanda de oxígeno. (Meneghini, 2020)

### 3.9.3 Conductividad eléctrica

Se define la conductividad eléctrica como la capacidad de que una sustancia pueda conducir la corriente eléctrica, y por tanto, es lo contrario de la resistencia eléctrica. Es una variable que depende de la cantidad de sales disueltas en un líquido. La unidad de medición utilizada comúnmente es el siemens/cm (S/cm), microsiemens/cm ( $\mu\text{S/cm}$ ), o milisiemens/cm (mS/cm). En soluciones acuosas el valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos (Adiveter, 2013).

Por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración mayor será la conductividad, como puede observarse en los valores apuntados a continuación:

- Agua pura: 0,055  $\mu\text{S/cm}$ .
- Agua destilada: 0,5  $\mu\text{S/cm}$ .
- Agua de montaña: 1,0  $\mu\text{S/cm}$ .
- Agua de uso doméstico: 500-800  $\mu\text{S/cm}$ .
- Agua de mar: 50.000-60.000  $\mu\text{S/cm}$ .

La conductividad eléctrica de una muestra de agua es la expresión numérica de su capacidad para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones en el agua, de su concentración total, de su movilidad, de su carga y de las concentraciones relativas, así como de la temperatura. De los muchos factores que afectan el comportamiento de los iones en solución, las atracciones y repulsiones eléctricas entre iones y la agitación térmica, son quizá los más importantes. Estos efectos se expresan a través de un parámetro conocido como fuerza iónica. Las soluciones de la mayoría de los ácidos, bases y sales inorgánicas son relativamente buenos conductores de la corriente eléctrica. Inversamente, las soluciones acuosas de solutos orgánicos, que no se disocian o que se disocian muy poco en el agua, poseen conductividades eléctricas muy bajas o similares a las del agua pura (Adiveter, 2013).

En la mayoría de soluciones acuosas, cuanto mayor es la concentración de sales disueltas, mayor es su conductividad eléctrica. Este efecto continúa hasta el punto de saturación de la sal o hasta que la solución se halla tan concentrada en iones que la restricción del movimiento, causada por un aumento posterior en la concentración, disminuye la conductividad eléctrica del sistema. Puesto que, a mayor temperatura, menor viscosidad, y a menor viscosidad, mayor libertad de movimiento, la temperatura también tiene una marcada influencia sobre la conductividad eléctrica de un sistema acuoso. Si bien el incremento de la conductividad eléctrica con la temperatura puede variar de un ión a otro, en general, se acepta que ésta aumenta en promedio un 3% por cada grado centígrado que aumente la temperatura (Meneghini, 2020).

#### **3.9.4 Sólidos disueltos Totales SDT**

La cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) es uno de los principales indicadores de la calidad del agua. El SDT es el total de sales disueltas y se puede expresar en mg/l, g/m<sup>3</sup> o ppm (mg/l). El hecho de que el agua tenga sales en disolución, hace que ésta sea conductiva a la electricidad. Así un agua con muchas sales, es muy conductiva y la medida de la conductividad permite evaluar de una forma rápida la salinidad del agua. Las sales más frecuentes en el agua son las de calcio, magnesio y sodio. En aguas no salobres, el

90 % del contenido de sales en el agua, son por presencia de calcio y magnesio. Además, dicho calcio y magnesio son molestos en la utilización del agua. La salinidad del agua es contenido total de sales. Así la cantidad de cloruro sódico es una parte de esta salinidad y la dureza del agua (sales de magnesio y calcio) es otra parte de la salinidad del agua (Meneghini, 2020).

### **3.9.5 Oxígeno Disueltos (LDO)**

Es uno de los indicadores más utilizados en sistemas bióticos ya que participa en un gran número de procesos que tienen lugar en el medio acuático. Es aportado por intercambio con la atmósfera y por la acción fotosintética de los productores primarios. Es utilizado por los microorganismos en los procesos de oxidación de la materia orgánica e inorgánica y en los de respiración. Se determina por el método de Winkler que involucra la precipitación del oxígeno como óxido de manganeso, su redisolución en medio ácido y la valoración mediante una yodometría (Adiveter, 2013).

El oxígeno disuelto es fundamental para la vida acuática, los bajos valores del mismo pueden producir mortandades masivas de organismos, sin embargo, existen sistemas como las turberas humedales donde predominan condiciones anóxicas, producto de la gran cantidad de materia orgánica en descomposición y de las bajas temperaturas (Neiff, 2001). En ecosistemas acuáticos impactados por las descargas de efluentes no tratados, con alta carga de materia orgánica (por ejemplos frigoríficos o industrias alimentarias), los valores de oxígeno disuelto disminuyen bruscamente producto de la descomposición de la materia orgánica, por lo que el monitoreo de este parámetro es muy útil.

## **IV. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1 Descripción del sitio de estudio.**

El Lago de Yojoa es el único de Honduras, con una superficie de alrededor de 90 km<sup>2</sup> y una profundidad media de 15 metros. Se encuentra ubicado en el centro-oeste de Honduras, entre los departamentos de Comayagua, Cortés y Santa Bárbara. Es reconocido como un área Ramsar desde 2005, lo que demuestra su importancia como un sitio de conservación de aves acuáticas y su hábitat. Su origen es volcánico y está rodeado por grandes montañas, algunas de las cuales son parques nacionales de la República de Honduras, como el Parque Nacional Cerro Azul Meámbar y el Parque Nacional Montaña de Santa Bárbara. Estas áreas protegidas contribuyen a la belleza escénica y la biodiversidad del lago (Studer, 2007).

El Lago de Yojoa tiene una gran importancia económica para las comunidades cercanas. Los pobladores se dedican a actividades como la agricultura, la pesca y los servicios turísticos, lo que genera empleo y contribuye al desarrollo local. Además, la cuenca del lago es conocida por ser rica en diversidad de aves, con más de 400 especies registradas, lo que la convierte en un destino popular entre los observadores de aves (Studer, 2007).

#### **4.1.1 Geomorfología**

La profundidad máxima es de 28.29 m siendo notable que esta zona se encuentre ubicada en la parte norte del Lago. Durante un año típico, el nivel del lago varía entre 2 y 3 m, los niveles más bajos en los meses de mayo y junio. El nivel máximo (controlado por la represa La Pita) es de 638 m.s.n.m., y el nivel mínimo, compatible con la generación de electricidad, es de 632 m.s.n.m. Los años que registran los niveles más bajos son 1971,

1972 y 1984 con un nivel a 633 m.s.n.m. (Vaux *et al.* 1993). El Lago de Yojoa debe su origen a la actividad volcánica de Cuaternario, que cerró la salida normal del antiguo valle del lago por el extremo norte (Cruz, 1980), formando un valle profundo a los 637 m.s.n.m. Casi el 30% del terreno de la Cuenca total tiene pendientes mayores de 50% Solo al norte y al sur del lago, y en la zona cerca de la oriental del espejo de agua, existen áreas apreciables de terrenos con pendientes suaves.

#### **4.1.2 Topografía, geología y suelos**

Los terrenos de las orillas norte y sur del Lago de Yojoa son planos, con suelos profundos y fértiles en el norte, mientras que al oeste, el terreno es rocoso y con pendientes fuertes, exceptuando la desembocadura de la quebrada Raíces. Al este, el terreno es montañoso hasta las faldas del cerro Azul Meámbar (Studer, 2007).

Geológicamente, el Lago de Yojoa se formó naturalmente, con montañas de rocas calcáreas al oeste y sur, resultado de levantamientos durante el Cretáceo. La geología kárstica de la zona sur crea depresiones y sistemas de cuevas, mientras que las montañas de Santa Bárbara tienen sumideros y quebradas que nacen por debajo de los 2000 msnm (Ramsar, 2005).

En los sectores este y norte, la geología está dominada por la actividad volcánica del Terciario, que formó las sierras del cerro Azul Meámbar. Las erupciones volcánicas más recientes en el norte crearon un flujo de lava que elevó el nivel del Lago (House *et al.*, 2003). Los suelos en el norte y este provienen de sedimentos aluviales y volcánicos, con texturas que van de franco limosas a franco arcillosas, mientras que al oeste, sobre roca calcárea, los suelos tienen drenaje lento y textura arcillosa (Ramsar, 2005).

#### **4.1.3 Clima**

La subcuenca del Lago de Yojoa es una de las zonas con mayor precipitación en Honduras, con un promedio anual de 2300 mm en el sur y 3200 mm en el norte, siendo

más lluviosa entre julio y septiembre. La temperatura promedio anual es de 23°C, variando entre 20°C en diciembre/enero y 24.8°C en mayo/junio. El clima es tropical a transición subtropical en el norte y subtropical en el sur. Las estaciones meteorológicas están ubicadas en elevaciones bajas, por lo que no capturan las precipitaciones en las montañas de Santa Bárbara y cerro Azul Meámbar, donde la parte este del lago recibe más de 3000 mm de lluvia anualmente (Ramsar, 2005).

La estación meteorológica El Jaral, en el este del Lago, registra la precipitación más alta de Honduras, con 3235 mm, haciendo de esta zona una de las más húmedas del país. A medida que se avanza hacia el sur, la precipitación disminuye, alcanzando 2500 mm en Pito Solo y 1600 mm en San Pedro Zacapa, la región más seca (House et al., 2003).

En cuanto a la temperatura, las estaciones de El Jaral y Santa Elena muestran datos continuos. El este del Lago tiene un promedio de 23.7°C, mientras que Santa Elena promedia 21.7°C. La estación seca dura cinco meses, con la evapotranspiración superando la precipitación entre febrero y abril. La temperatura del agua del lago promedia 24.9°C en la superficie y 23°C en el fondo (House et al., 2003).

El clima del Lago de Yojoa tiene dos modalidades: muy lluvioso de barlovento en el norte y de altura en el sur, lo que influye significativamente en la diversidad ecológica y biológica de la región (Ramsar, 2005).

## 4.2 Mapa de ubicación.

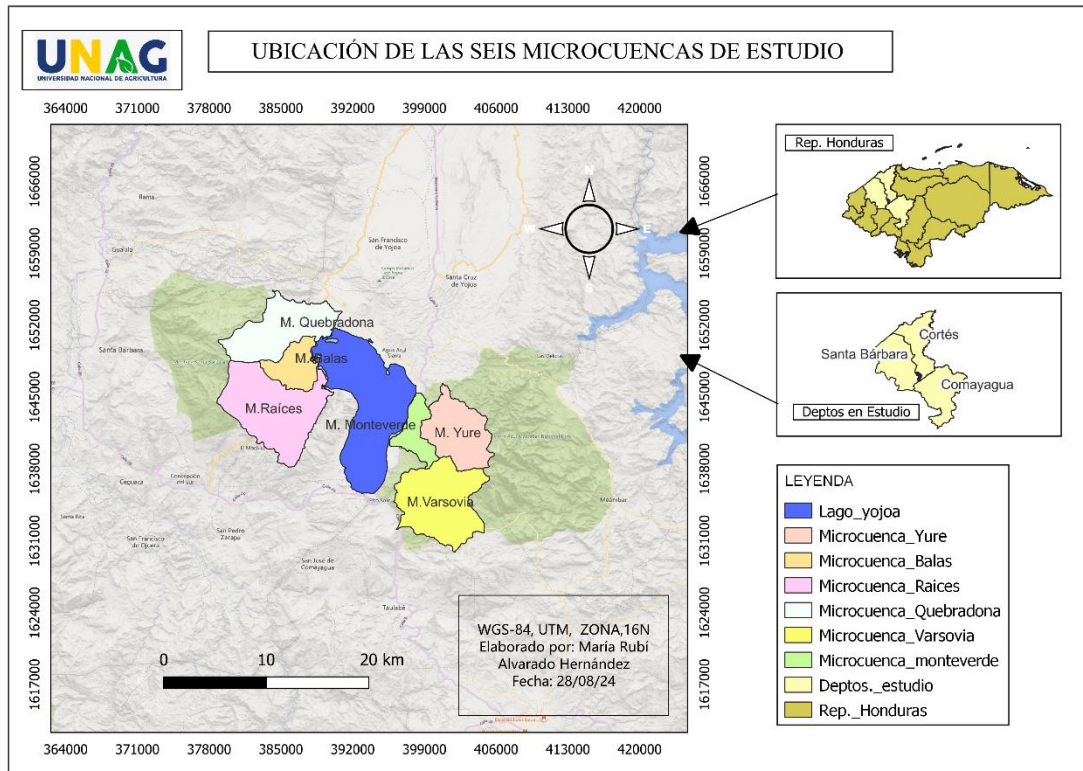


Figura 2 .Mapa de ubicación

La imagen muestra la ubicación de seis microcuencas de estudio en la región alrededor del Lago de Yojoa, en Honduras. Las microcuencas analizadas incluyen Yure, Balas, Raíces, Quebradona, Monteverde, y Varsovia, cada una representada con un color distinto en el mapa. Estas microcuencas se encuentran en las cercanías de los departamentos de Cortés, Santa Bárbara, y Comayagua, en la zona central del país.

### 4.3 Red hídrica

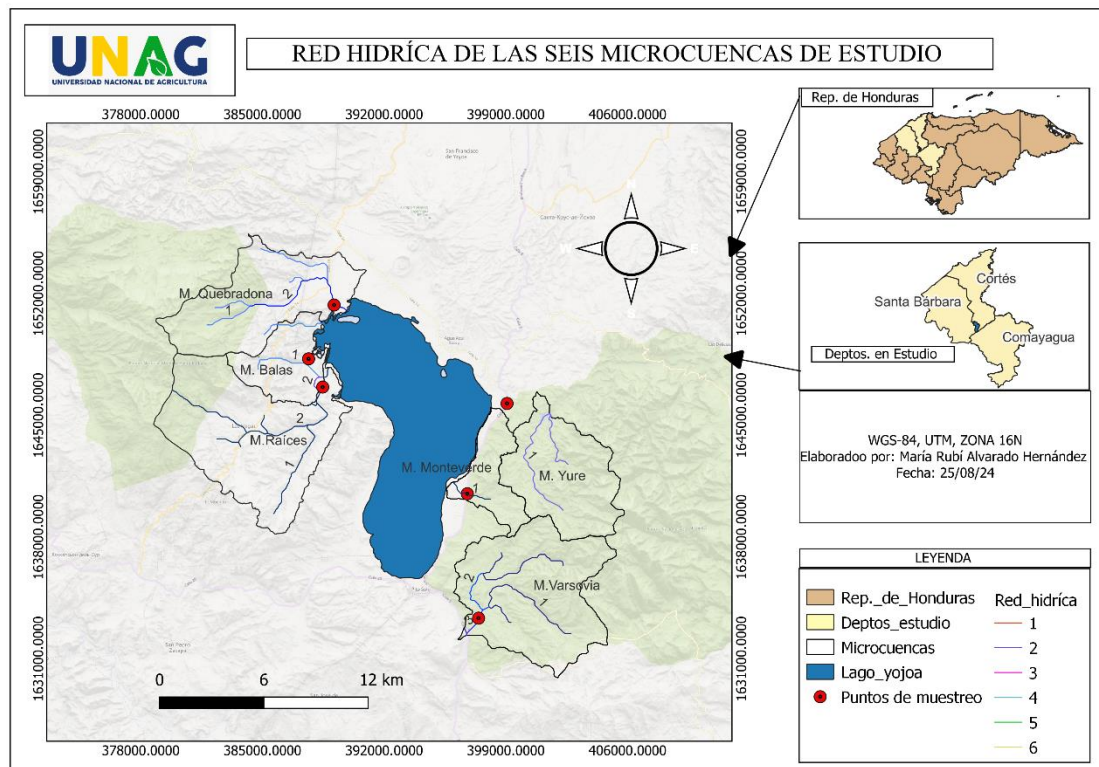


Figura 3. Red hídrica de las seis microcuencas de estudio

### 4.4 Materiales y equipo

Para llevar a cabo el estudio, se utilizó una variedad de materiales y equipos esenciales para la recolección y análisis de datos. Entre los materiales empleados se encuentran una cinta métrica para las mediciones de distancia precisas y guantes para la protección personal durante las labores de campo. La papelería fue necesaria para el registro de observaciones y datos in situ, y se dispuso de combustible para asegurar la movilidad durante las actividades de campo.

En cuanto al equipo utilizado, se empleó un GPS para la georreferenciación precisa de los puntos de muestreo, y una computadora para el procesamiento y análisis de los datos recolectados. El trabajo en campo también requirió el uso de un vehículo para acceder a las áreas de estudio. Adicionalmente, se utilizó un equipo multiparamétrico portátil para

medir diversas características fisicoquímicas del agua, complementado con un pHmetro para la medición específica del pH en las muestras de agua.

#### **4.5 Método**

El modelo de investigación por el cual se inclina esta investigación es Descriptivo como su palabra lo indica describir y caracterizar las variables de interés en un ambiente específico. En el caso del Análisis de las condiciones morfométricas y de las características fisicoquímicas en seis microcuencas afluentes del Lago de Yojoa en Honduras, este ayudara a identificar las características actuales del agua, siendo el caso los parámetros morfométricos y fisicoquímicos como ser la temperatura, pH, turbidez, oxígeno disuelto, entre otros.

#### **4.5. Análisis de las condiciones morfométricas y de las características fisicoquímicas**

Se utilizaron herramientas de georreferenciación SIG con el programa de código libre QGIS®. Se realizaron modelos de elevación digital (DEMs) de cada microcuenca y se generaron pendientes, agregando capas vectoriales representando ríos de las seis microcuencas afluentes del Lago de Yojoa. Se presentaron parámetros de forma, relieve y red de drenaje, analizados a nivel de cada microcuenca en función de la planificación territorial de la cuenca del Lago de Yojoa en Honduras.

##### **4.5.1 Parámetros de forma**

Como área y perímetro, se obtuvieron con la tabla de atributos de cada capa de las microcuencas. La longitud axial y el ancho de la cuenca se midieron con la herramienta de medición de línea en QGIS®. Los factores de compacidad, forma, índice de alargamiento se calcularon usando fórmulas 3,4,5, de la revisión de literatura. El desnivel altitudinal se obtuvo de la diferencia entre las cotas máxima y mínima de la cuenca.

#### 4.5.2. Parámetros de relieve

Tanto la cota máxima como la mínima se obtuvieron del DEM, generado con curvas de nivel y las capas de las microcuencas. Las pendientes de las seis microcuencas también se derivaron del DEM. La pendiente media de la cuenca se extrajo de la información de propiedades en QGIS.

En las curvas hipsométricas y el histograma de frecuencia altimétrica, se generaron documentos CSV a partir del DEM y las capas de contorno de cada microcuenca. Estos datos se procesaron en Excel los datos que incluye son área en m y altitud seguidamente se convierte el área a  $\text{km}^2$  para sacar el área entre curvas, teniendo estos resultados se procede a sacar áreas acumuladas y parciales, permitiendo trazar las curvas hipsométricas y los histogramas de frecuencia altimétrica.

#### 4.5.3 Parámetros para la Red de Drenaje

Para calcular la densidad de drenaje, se aplicó la fórmula descrita en la revisión de literatura, que relaciona la densidad de drenaje con la longitud total de todas las corrientes dividida entre el área de la cuenca. El tiempo de concentración se determinó utilizando los métodos de Clark descrito en la ecuación 7 de la revisión de literatura. El orden de la corriente y el número de escurrimientos se determinaron convirtiendo la red de drenaje a vectores mediante la herramienta de redes de canales y cuencas de drenaje en QGIS®. Una vez obtenidos estos datos, se calculó el coeficiente de torrencialidad, definido como el número de corrientes de primer orden dividido entre el área de la microcuenca.

#### 4.6. Fisicoquímica:

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos se utilizó una sonda multiparamétrica HYDROLAB®-SURVEYOR®, la cual permitió medir diferentes

variables como temperatura, conductividad, oxígeno disuelto total (LDO total) y oxígeno disuelto (LDO disuelto). Además, se empleó un pH metro para medir el pH, la conductividad y la concentración de sales disueltas (SDT), con el propósito de verificar los resultados obtenidos por ambas tecnologías.

Estos análisis se llevaron a cabo en las seis microcuencas afluentes del lago de Yojoa, con mediciones realizadas una vez por semana. Cuando se realizaron estas mediciones, se tomó en cuenta la calibración de los equipos y la limpieza al llegar a cada uno de los ríos, ya que era esencial realizar el debido proceso para evitar sesgos en la obtención de datos.



*Ilustración 1. Toma de datos con sonda HYDROLAB*



*Ilustración 2. Toma de datos con pHmetro*

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Morfometría de las microcuencas

En el contexto de las microcuencas tributarias del Lago de Yojoa, el estudio morfométrico proporciona una base sólida para identificar patrones de erosión, susceptibilidad a inundaciones, y capacidad de retención de agua, elementos esenciales para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la mitigación de riesgos ambientales en la región.

#### 5.1.1 Parámetros de forma de las microcuencas

*Tabla 7. Morfometría asociada a la forma de las microcuencas tributarias del Lago de Yojoa*

| <b>Microcuenca</b> | <b>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Perímetro<br/>(km)</b> | <b>Ancho<br/>promedio<br/>(km)</b> | <b>Longitud<br/>axial (km)</b> | <b>Factor<br/>de<br/>forma<br/>(f)</b> |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| Raíces             | 62.158                           | 47.074                    | 11.436                             | 9.628                          | 0.681                                  |
| Varsovia           | 54.368                           | 38.778                    | 9.302                              | 9.064                          | 0.658                                  |
| Quebradona         | 42.824                           | 37.862                    | 6.96                               | 10.822                         | 0.358                                  |
| Yure               | 35.449                           | 31.158                    | 6.456                              | 7.572                          | 0.905                                  |
| Balas              | 18.226                           | 25.856                    | 5.676                              | 5.11                           | 1.322                                  |
| Monteverde         | 14.62                            | 25.398                    | 3.721                              | 5.094                          | 0.69                                   |

*Tabla 8. Parámetros de forma de las microcuencas.*

| <b>Microcuenca</b> | <b>Coefficiente de compacidad (Kc)</b> | <b>Índice de alargamiento (Ial)</b> | <b>Desnivel Altitudinal (msnm)</b> |
|--------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Raíces             | 1                                      | 0.204                               | 2065                               |
| Varsovia           | 1.315                                  | 0.974                               | 1359.24                            |
| Quebradona         | 1.446                                  | 1.554                               | 2065                               |
| Yure               | 1.308                                  | 1.172                               | 1300                               |
| Balas              | 1.514                                  | 0.900                               | 965                                |
| Monteverde         | 1.661                                  | 1.368                               | 460                                |

Quebradona, con el factor de forma más bajo, indica una microcuenca muy alargada, mientras que Balas, con un factor de forma alto, indica una microcuenca muy ensanchada. (Ver tabla 3). Las microcuencas más circulares tienden a tener una respuesta hidrológica más rápida y concentrada, estos valores varían desde 0.358 en Quebradona hasta 1.322 en Balas

Lombaida (2020) indica que un coeficiente de compacidad de 1 (Raíces) equivale a una clasificación de casi redonda a oval-redonda lo que sugiere que está expuesta a altas tendencias de inundaciones, Monteverde, con un coeficiente de 1.661 la clasifica como una microcuenca Oval alargada a alargada con baja tendencia a inundaciones.

### 5.1.2 Morfometría del relieve de las microcuencas

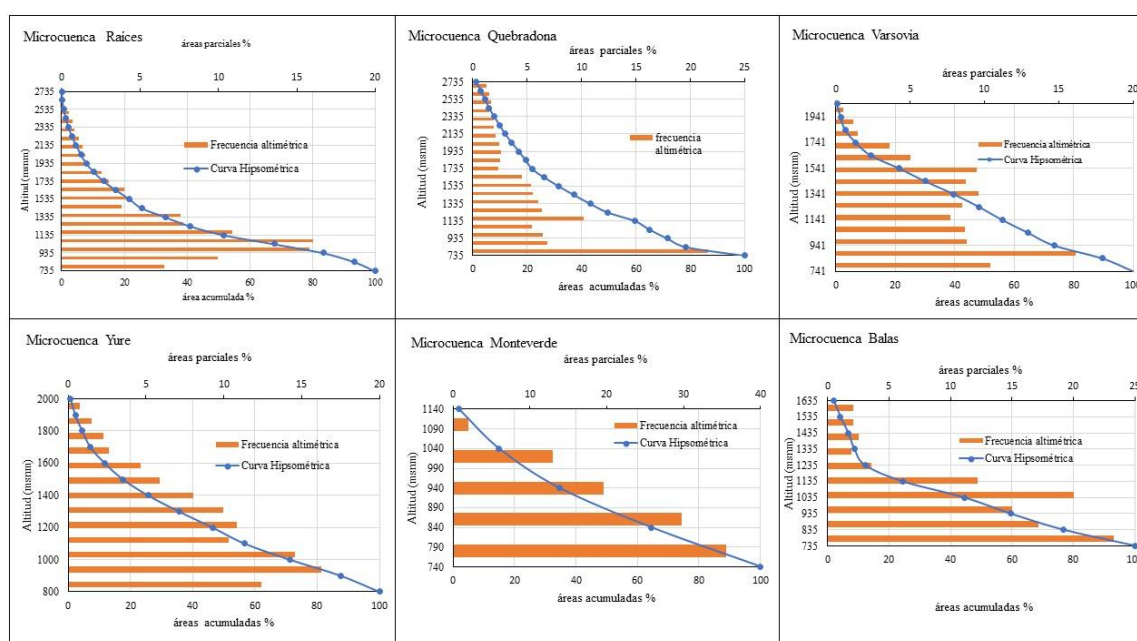
*Tabla 9. Morfometría asociada al relieve*

| <b>Microcuenca</b> | <b>Cota máxima (msnm)</b> | <b>Cota mínima (msnm)</b> | <b>pendiente media</b> |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| Raíces             | 2700                      | 635                       | 27.498                 |
| Varsovia           | 2000                      | 640.76                    | 25.948                 |
| Quebradona         | 2700                      | 635                       | 26.346                 |
| Yure               | 2000                      | 700                       | 29.511                 |
| Balas              | 1600                      | 635                       | 22.472                 |
| Monteverde         | 1100                      | 640                       | 16.515                 |

**Las cotas** más altas (2700 msnm) se observan en las microcuencas Raíces y Quebradona, lo que indica áreas montañosas y la Cota Mínima varía ligeramente entre 635 msnm (varias microcuencas) y 700 msnm. Para la pendiente media según Hernández et al. 2021 van desde 16.52% (Microcuenca Monteverde) se les describe como moderadamente inclinadas y las que tienen rangos de 29.51% (Microcuenca Yure) se les describe como empinadas (Véase en la tabla 5 de Clasificaciones de cuencas de acuerdo a su pendiente).

### 5.1.3 Curvas Hipsométricas e histogramas de frecuencia altimétrica

De acuerdo con la forma de la curva hipsométrica, se infiere que la microcuenca se encuentra en etapa de equilibrio y madurez con estabilización con los procesos de erosión del suelo (Gaspari et al., 2012)



*Figura 4. Representación de Curvas Hipsométricas e Histogramas Altitudinales*

La microcuenca Raíces muestra una amplia distribución altitudinal de 1600 y 1000 msnm, representando alrededor del 50% del área acumulada total., con la mayor parte de su área concentrada en las altitudes medias (1000-1600 msnm) y bajas (735-1000 msnm). La curva hipsométrica cóncava indica que la microcuenca está en una etapa madura de desarrollo geomorfológico, con una estabilidad relativa en las altitudes bajas, donde se ha producido una acumulación significativa de sedimentos (Horton, 1945; Quesada y Barrantes, 2017).

Para Varsovia la mayor concentración de área se encuentra entre las altitudes de 1400 y 1000 msnm, representando aproximadamente el 55% del área acumulada total. Hay una distribución bastante equilibrada en las altitudes bajas y medias, con menos área en las altitudes más altas. La microcuenca Varsovia tiene una curva hipsométrica que sugiere una etapa de desarrollo geomorfológico intermedia, con un equilibrio entre los procesos de erosión y sedimentación. La concentración de área en altitudes medias indica una cuenca que aún mantiene una capacidad de erosión, pero que también está acumulando sedimentos en las partes más bajas (Strahler, 1957; Aguilar y Naranjo, 2018).

La mayor parte del área se concentra entre las altitudes de 1600 y 1000 msnm, similar a la microcuenca Raíces. La microcuenca Quebradona, al igual que Raíces, muestra una curva hipsométrica cóncava con una concentración de áreas en altitudes medias y bajas. Esto indica que la cuenca está en una fase madura de su desarrollo geomorfológico, con una reducción en la capacidad de erosión y una mayor estabilidad en el relieve. La similitud en la altitud máxima entre Raíces y Quebradona sugiere que ambas cuencas comparten características geológicas y climáticas similares (Quesada y Barrantes, 2017).

La microcuenca Yure tiene una altitud máxima de 2000 msnm, con la mayor parte de su área distribuida entre 1200 y 1000 msnm. Las altitudes entre 1600 y 1400 msnm también muestran una frecuencia considerable, indicando una segunda área de importancia dentro de la microcuenca. Esto sugiere que la microcuenca está en una etapa de desarrollo geomorfológico intermedio, donde las áreas altas experimentan erosión y los sedimentos se acumulan en las partes medias y bajas (Horton, 1945; Strahler, 1957).

La microcuenca Balas presenta una altitud máxima de 1635 msnm, y la mayor parte de su área se encuentra en altitudes medias y bajas, particularmente entre 1000 y 800 msnm representando aproximadamente el 60% del área acumulada total. Otra porción significativa del área está distribuida en altitudes bajas, entre 1300 y 1100 msnm. Esto indica que la cuenca ha alcanzado un estado de madurez geomorfológica, con la erosión concentrada en las partes altas y la sedimentación en las partes más bajas. La distribución sugiere un relieve suavizado y una menor capacidad erosiva (Strahler, 1957; Aguilar y Naranjo, 2018).

La microcuenca Monteverde, con una altitud máxima de 1140 msnm, tiene una mayor concentración de área en altitudes bajas (900 a 800 msnm) representando aproximadamente el 40% del área acumulada total. Existe una distribución notable en altitudes de 1000 a 900 msnm. Este perfil altitudinal sugiere que la cuenca está en un equilibrio geomorfológico, donde los procesos de erosión y sedimentación están más equilibrados en comparación con Yure y Balas (Horton, 1945; Quesada y Barrantes, 2017).

Yure y Raíces/Quebradona comparten características de cuencas con mayor altitud y, por lo tanto, un mayor potencial erosivo en sus partes altas, aunque Yure es algo más baja en altitud máxima. Balas y Monteverde presentan características de cuencas más maduras, con una mayor estabilidad y menos variabilidad altitudinal, similar a Raíces y Quebradona, pero en un contexto de altitudes generales más bajas. Varsovia se distingue por tener una altitud máxima menor y un perfil menos expuesto a la erosión, lo que sugiere que está en una fase de madurez intermedia, aún con capacidad erosiva en sus partes altas, pero en un camino hacia la estabilidad que ya caracteriza a las otras cuencas.

#### **5.1.4 Parámetros de Red de drenaje de las microcuencas**

*Tabla 10. Parámetros asociados a la red de drenaje.*

| Microcuenca       | Densidad de drenaje | Tiempo de Concentración Clark | Longitud del cauce principal (km) | Longitud de todos los causes (km) | Orden de la corriente | Coefficiente de torrencialidad |
|-------------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| <b>Varsovia</b>   | 0.96                | 1.364                         | 6.472                             | 52.254                            | 3                     | 0.07                           |
| <b>Yure</b>       | 0.59                | 1.019                         | 3.481                             | 21.238                            | 2                     | 0.05                           |
| <b>Raíces</b>     | 0.67                | 1.452                         | 5.406                             | 41.68                             | 2                     | 0.08                           |
| <b>Quebradona</b> | 0.49                | 1.179                         | 3.341                             | 20.997                            | 2                     | 0.09                           |
| <b>Balas</b>      | 0.24                | 0.745                         | 1.69                              | 4.422                             | 2                     | 0.05                           |
| <b>Monteverde</b> | 0.86                | 0.716                         | 4.323                             | 12.585                            | 1                     | 0.06                           |

**La red de drenaje** Para los factores de densidad de drenaje de cuencas según Strahler / Horton afirma valores menores que 1 representan una categoría baja lo que lleva a una interpretación ambiental de baja esorrentía y aumento de infiltración y como se observa en la tabla anterior los valores de las seis microcuencas son menores que 1.

Además, con el uso del método de Clark afirma que los tiempos más largos, como en las microcuencas Raíces (1.452 horas) y Varsovia (1.364 horas), sugieren una respuesta más lenta, ideal para manejar flujos extensos, pero potencialmente propensos a acumulación de sedimentos. Los tiempos más cortos en Balas (0.74 horas) y Monteverde (0.71 horas) indican una respuesta más rápida, aumentando el riesgo de inundaciones rápidas (Bedient & Huber, 2002).

La longitud del cauce principal refleja la extensión del principal canal de drenaje. Microcuencas con longitudes mayores (Varsovia con 6.472 km y Raíces con 5.406 km) tienen cauces más largos que pueden soportar un mayor flujo de agua, mientras que microcuencas con longitudes menores (Balas con 1.69 km) tienen cauces más cortos y posiblemente menos capacidad para drenar grandes volúmenes de agua (Lombaida 2020).

Un mayor orden de la corriente Según Strahler en su clasificación las microcuencas Varsovia con orden 3 indica una red de drenaje más compleja y ramificada. Esto suele correlacionarse con una mayor capacidad para manejar el escurrimiento y la sedimentación. En comparación a un menor orden de la corriente (como en Monteverde con orden 1) sugiere una red menos compleja.

El índice de torrencialidad es un indicador crucial del potencial de erosión y la capacidad de una cuenca para generar flujos torrenciales. Los valores observados varían de 0.05 a 0.09, con el valor más alto en Quebradona (0.09), lo que indica que esta microcuenca tiene el mayor potencial de torrencialidad, seguido por Raíces (0.08). Estos valores indican un riesgo moderado de generación de flujos torrenciales, con posibles implicaciones en la erosión del suelo y la movilización de sedimentos. Es importante destacar que microcuencas con alta densidad de drenaje y menor tiempo de concentración, como Quebradona, tienen una tendencia más alta a la torrencialidad, ya que estas condiciones favorecen el rápido escurrimiento superficial. (Horton, 1945).

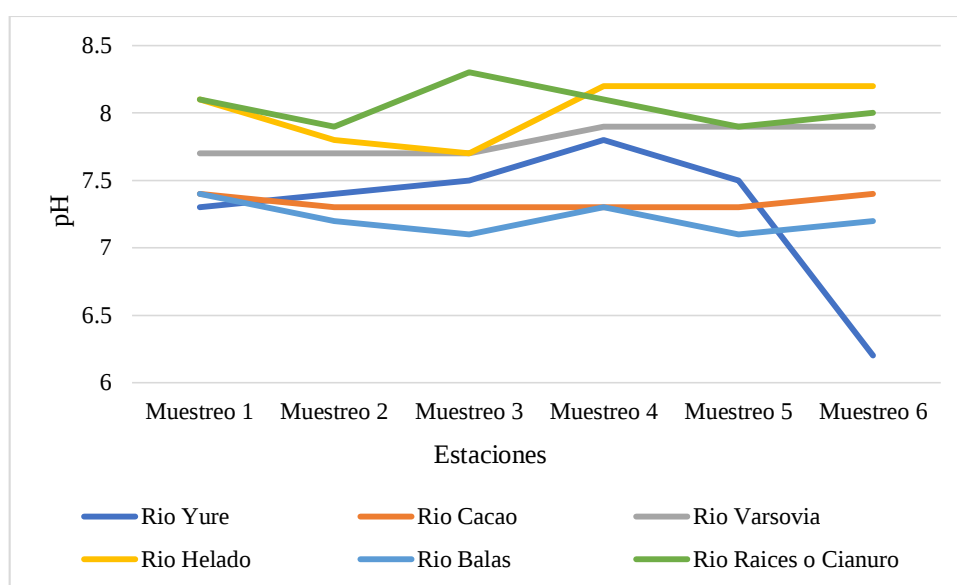
## **5.2 Características fisicoquímicas del agua en las microcuencas durante la época seca.**

Estos parámetros están interrelacionados mostraron una visión integral del estado fisicoquímico, Por ejemplo, un aumento en los SDT generalmente lleva a un incremento en la CE, ya que hay más iones en solución que pueden conducir electricidad.

La temperatura puede influir en la solubilidad de los sólidos disueltos y, por ende, en la Conductividad Eléctrica. El pH puede afectar la forma y la solubilidad de los compuestos disueltos, alterando así los SDT y la Conductividad Eléctrica.

Se muestra a continuación análisis de los diferentes parámetros que fueron tomados en los ríos tributarios del Lago de Yojoa-

### 5.2.1 pH



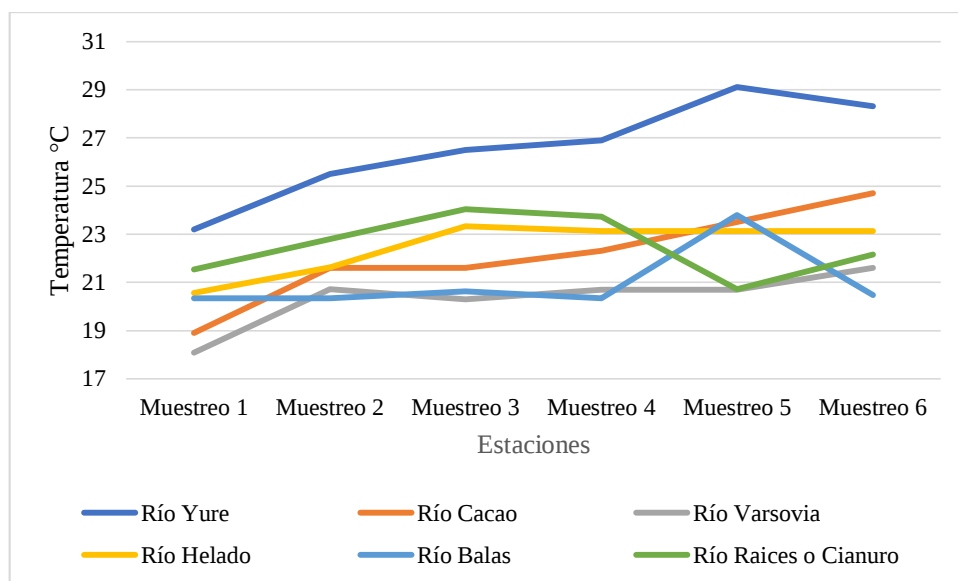
*Figura 5 Valoración de pH en seis ríos*

El Río Yure muestra una ligera acidez con valores de pH entre 6.5 y 7, posiblemente debido a la geología de la cuenca y la influencia de materia orgánica. En contraste, los ríos Cacao, Varsovia y Helado presentan pH más estables y ligeramente alcalinos, entre 7 y 8, lo que sugiere una buena capacidad de tamponamiento, influenciada por la presencia de carbonatos y bicarbonatos. Estos iones, comunes en ríos que atraviesan áreas con formaciones calizas o que reciben aportes de aguas subterráneas, ayudan a mantener el pH estable y a prevenir la acidificación, lo cual es crucial para mantener la biodiversidad acuática (Stumm y Morgan, 2012; Johnson et al., 2014; Wetzel, 2001).

Por otro lado, el Río Raíces o Cianuro ha mostrado una disminución en su pH hacia valores cercanos a 6.5, lo que podría ser indicativo de contaminación industrial o agrícola, afectando negativamente a la biodiversidad. La acidificación del agua puede comprometer la capacidad de los organismos acuáticos para mantener el equilibrio osmótico, lo que afecta su supervivencia (Rabalais et al., 2002). Además, la estabilidad del pH, como se observa en ríos como el Balas, es fundamental para evitar impactos negativos en la fauna acuática, especialmente en organismos sensibles a cambios en la acidez del agua (Dodds y Whiles, 2010).

### 5.2.2 Temperatura

La variación en la temperatura del agua en los diferentes ríos esta influenciada por múltiples factores, incluidos la altitud, la cobertura vegetal, el caudal del río, y las actividades humanas en las microcuencas hidrográficas. Según estudios realizados por Brown et al. (2003), la temperatura del agua es un indicador clave de la salud de los ecosistemas acuáticos, afectando la solubilidad del oxígeno y la vida acuática. Un aumento en la temperatura puede llevar a una disminución en los niveles de oxígeno disuelto, lo que puede tener impactos negativos en la fauna acuática

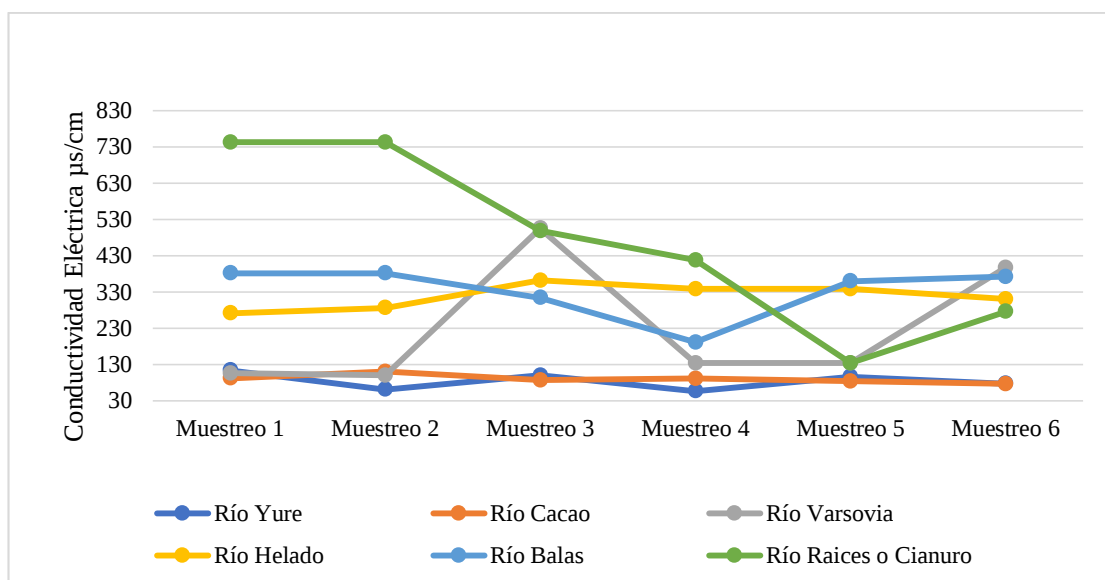


*Figura 6. Valoración de temperatura*

El Río Yure muestra un incremento gradual de la temperatura, alcanzando cerca de 30°C en los primeros muestreos, lo que sugiere la influencia de la radiación solar debido a su caudal reducido, que permite un mayor calentamiento. Según Caissie (2006), los cuerpos de agua más pequeños y menos profundos son más susceptibles a variaciones de temperatura. En contraste, el Río Cacao y el Río Raíces o Cianuro presentan temperaturas más estables, con ligeras fluctuaciones entre 20°C y 25°C. Esta estabilidad térmica, particularmente en el Río Cacao, puede atribuirse a la densa cobertura vegetal que regula la temperatura del agua, como lo indican Moore et al. (2005), y en el Río Raíces, a la posible influencia de afluentes más fríos (Vannote et al., 1980).

Por otro lado, el Río Varsovia muestra una notable variabilidad térmica, especialmente en el tercer muestreo, posiblemente debido a un evento climático que incrementó la radiación solar o a una disminución temporal en el flujo. Webb et al. (2008) destacan que los ríos pueden experimentar aumentos de temperatura por cambios meteorológicos. El Río Helado, con temperaturas consistentemente más bajas (20°C-25°C), podría estar influenciado por su altitud y la presencia de aguas subterráneas frías, factores que Johnson (2004) identifica como críticos para mantener temperaturas más bajas. El Río Balas, con su tendencia de temperatura constante y ligeras fluctuaciones, refleja un equilibrio entre el caudal y la influencia térmica externa, como lo señalan Poole y Berman (2001) en sus estudios sobre ríos con caudales estables.

### **5.2.3 Conductividad Eléctrica**

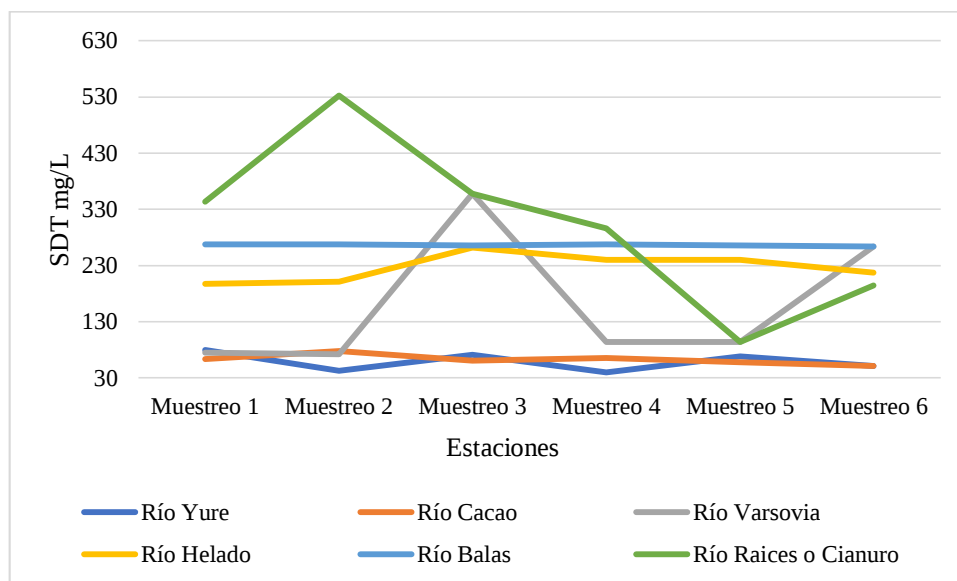


*Figura 7. Valoración de conductividad  $\mu\text{S}/\text{cm}$*

El Río Yure y el Río Cacao presentan conductividades relativamente bajas y estables, con valores entre 130-230  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 90-110  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente. Esta estabilidad sugiere una baja variabilidad en la concentración de iones disueltos, indicando entornos acuáticos con poca influencia de fuentes contaminantes o intervención humana. Según Ríos et al. (2014) y Navarro y Ponce (2011), los cuerpos de agua con conductividades bajas suelen estar menos afectados por actividades antropogénicas y presentan una mejor calidad del agua, lo que es típico en áreas forestales o zonas protegidas donde la vegetación riparia contribuye a la filtración natural.

En contraste, el Río Varsovia y el Río Raíces o Cianuro muestran conductividades más variables y elevadas. El Río Varsovia presenta un pico de 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , posiblemente debido a eventos de contaminación temporal o escorrentía agrícola, mientras que el Río Raíces alcanza los 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que sugiere una influencia significativa de actividades industriales o agrícolas. La disminución de la conductividad en ambos ríos en muestreos posteriores podría indicar la dilución de contaminantes o fluctuaciones en el caudal. Gómez y Morales (2009) y López et al. (2013) señalan que tales variaciones en la conductividad están asociadas con fenómenos de contaminación y cambios en el uso del suelo, particularmente en cuencas con alta actividad humana.

#### 5.2.4 Sólidos disueltos totales



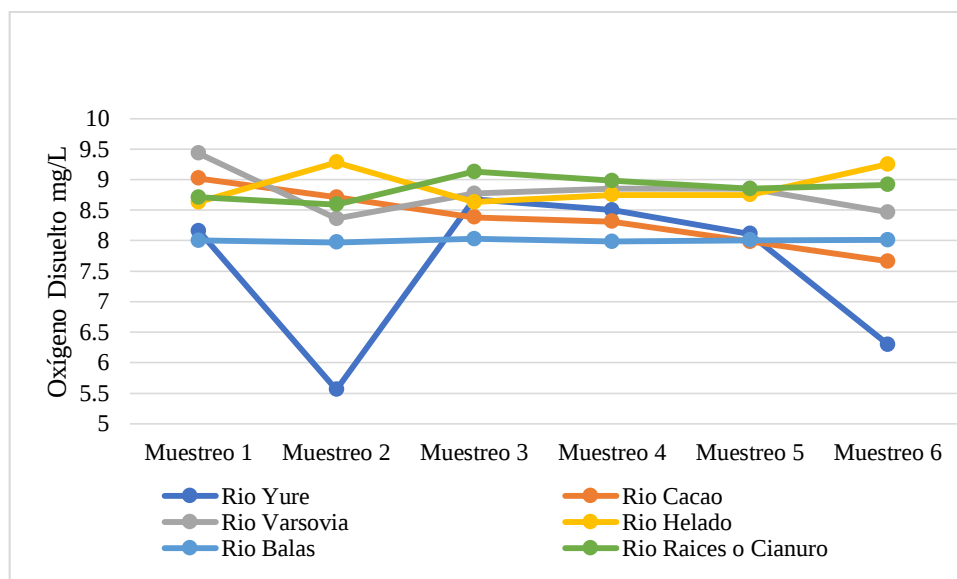
*Figura 8. Valoración de Sólidos Disueltos Totales*

El Río Yure y el Río Cacao presentan niveles de sólidos disueltos totales (SDT) relativamente bajos y estables, con concentraciones entre 130-230 mg/L y 90-110 mg/L, respectivamente. Esta estabilidad sugiere un entorno acuático con poca intervención humana y una baja carga de contaminantes, lo que podría deberse a un caudal constante y a la presencia de vegetación riparia que filtra el agua de manera natural. Según Carvajal et al. (2010) y Navarro y Ponce (2011), ríos con bajos niveles de SDT suelen estar menos expuestos a contaminantes y muestran una mejor calidad del agua.

En contraste, los ríos Varsovia, Helado y Raíces o Cianuro muestran una mayor variabilidad en los niveles de SDT. El Río Varsovia experimenta un pico significativo en el tercer muestreo, alcanzando los 500 mg/L, posiblemente debido a descargas puntuales de contaminantes, mientras que el Río Helado mantiene un nivel constante alrededor de 250 mg/L, reflejando un equilibrio en la mezcla de aguas superficiales y subterráneas. El Río Raíces o Cianuro presenta los valores más altos de SDT, con hasta 530 mg/L, lo que sugiere la influencia de actividades industriales o agrícolas en la cuenca. López et al. (2013), Martínez y Torres (2010), y Gómez y Morales (2009) señalan que estos picos y

variaciones en los SDT pueden estar asociados con la contaminación por efluentes y cambios en el uso del suelo.

### 5.2.5 Oxígeno Disuelto



*Figura 9. Valoración de Oxígeno Disuelto*

El Río Yure presenta una fluctuación significativa en la concentración de oxígeno disuelto, con una notable disminución en el segundo muestreo a menos de 5 mg/L, probablemente debido a un incremento en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) causada por una mayor carga orgánica. García et al. (2008) explican que esta disminución es común en cuerpos de agua que reciben descargas de materia orgánica, lo que puede llevar a condiciones de hipoxia. En contraste, los ríos Cacao y Varsovia mantienen niveles más estables y altos de oxígeno disuelto, fluctuando alrededor de 8 mg/L y 9 mg/L, respectivamente, lo que indica entornos acuáticos saludables con buena circulación de agua y baja contaminación orgánica, lo que es crucial para mantener un equilibrio ecológico favorable (Hernández et al., 2010; Ramírez et al., 2011).

Por otro lado, los ríos Helado y Balas mantienen niveles de oxígeno disuelto altos, cercanos a 9 mg/L y 8 mg/L, respectivamente, con el Río Helado beneficiándose de temperaturas más bajas que favorecen la solubilidad del oxígeno. Ortega et al. (2009)

señalan que los ríos con temperaturas más frías tienen mayor capacidad para disolver oxígeno, crucial para la salud de los ecosistemas acuáticos.

El Río Raíces o Cianuro muestra niveles relativamente estables, alrededor de 8 mg/L, con una ligera disminución en el último muestreo, posiblemente debido a un aumento en la carga de contaminantes o una reducción en el caudal, lo que podría haber afectado la capacidad del río para airearse naturalmente (López y Rodríguez, 2006).

### 5.2.6 Conductividad Eléctrica y Sólidos Disueltos Totales

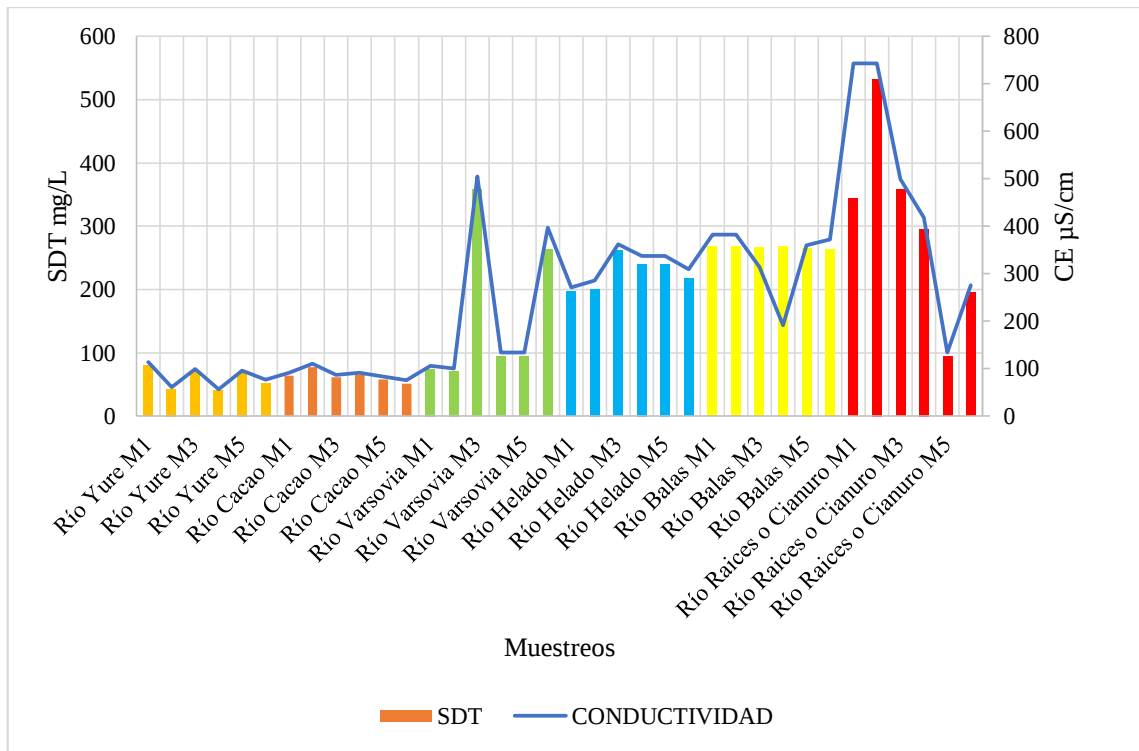


Figura 10. Comparación de Conductividad y Sólidos Disueltos Totales

Existe una correlación directa entre la conductividad y los SDT en la mayoría de los muestreos. Cuando la conductividad aumenta, también lo hacen los SDT, lo que indica que ambos parámetros están fuertemente relacionados en estos cuerpos de agua. Esto es común en sistemas acuáticos donde la calidad del agua está influenciada por aportes de sales y otros sólidos disueltos (López *et al.*, 2021).

Algunas estaciones, como "Río Varsovia M3 (Muestreo tres)" y "Río Raíces M2", (Muestreo dos) muestran picos pronunciados en ambos parámetros, lo que en efecto indica la presencia de fuentes puntuales de contaminación con una alta concentración de minerales en esas áreas ya que el Río Raíces su corriente esta fuertemente influenciada por la minería, siembra de maíz, ganadería entre otras: Estas observaciones coinciden con estudios que han encontrado que actividades antropogénicas pueden contribuir a estos incrementos en conductividad y SDT (Hernández *et al.*, 2021).

En ciertos puntos, como "Río Balas M3", se observa una discrepancia entre la conductividad y los SDT, donde la conductividad es alta, pero los SDT no muestran un aumento proporcional. Considerando que la toma de los datos se hacía a una distancia de 50m del nacimiento del acuífero aproximadamente, también se puede afirmar que existen iones específicos que contribuyen más a la conductividad que a la masa total de sólidos disueltos, un fenómeno que ha sido reportado en estudios sobre aguas subterráneas con alta concentración de ciertos iones como cloruros o sulfatos (Ortiz *et al.*, 2022).

## VI. CONCLUSIONES

El análisis morfométrico destaca una diversidad significativa en las formas, pendientes y redes de drenaje, influyendo en su respuesta hidrológica y susceptibilidad a la erosión e inundaciones. Microcuencas como Raíces y Quebradona, con mayor área y altura, muestran un mayor potencial de escorrentía y erosión, mientras que Balas y Monteverde, más pequeñas y menos empinadas, favorecen la infiltración y tienen menor riesgo de inundación. Las curvas hipsométricas y los histogramas altimétricos resaltan la complejidad geomorfológica que define el comportamiento hidrológico de cada microcuenca.

El análisis fisicoquímico de las microcuencas indica que los valores de sólidos disueltos totales (SDT) y conductividad eléctrica varían considerablemente entre las microcuencas, reflejando las diferencias en la geología y el uso del suelo. Microcuencas con mayores valores de conductividad, como Raíces y Quebradona, sugieren una mayor mineralización y posibles influencias antrópicas, mientras que las microcuencas con valores más bajos de SDT, como Yure y Monteverde, podrían indicar una menor carga de contaminantes disueltos.

El Lago de Yojoa, un sitio de alto valor ecológico en Honduras, revela la delicada interacción entre su geografía volcánica y la influencia humana. Este lago, el único de agua dulce del país y reconocido como un sitio Ramsar, enfrenta desafíos críticos para su conservación debido a la variabilidad en sus características morfométricas y fisicoquímicas. Los resultados subrayan la importancia de implementar medidas de manejo integral que protejan la calidad del agua y preserven su biodiversidad única. Este estudio ofrece una base esencial e inicial para la toma de decisiones que aseguren la sostenibilidad del Lago de Yojoa, un recurso vital para Honduras.

## **V11. RECOMENDACIONES**

Establecer un sistema de monitoreo continuo en las microcuencas, especialmente en aquellas con alta susceptibilidad a la escorrentía rápida y sedimentación, como Balas y Monteverde. Este monitoreo debe incluir mediciones de caudales, sedimentación y calidad del agua para detectar y mitigar posibles impactos antes de que se conviertan en problemas graves.

Promover la reforestación en las zonas altas de las microcuencas donde la erosión es más activa. Se deben aplicar técnicas de control de erosión, como terrazas y barreras vegetativas, para reducir el impacto de la escorrentía superficial y mejorar la infiltración del agua en el suelo.

Implementar programas de educación y concienciación ambiental para las comunidades locales que habitan alrededor del Lago de Yojoa. Estos programas deben enfocarse en la importancia de preservar la calidad del agua y la biodiversidad de las microcuencas, así como en las prácticas sostenibles de uso de la tierra que minimicen la contaminación y la degradación ambiental.

## VIII. REVISION BIBLIOGRÁFICA

- Aguilar, J. C., & Naranjo, F. (2018). *Evolución geomorfológica y curvas hipsométricas: Un estudio aplicado en cuencas hidrográficas*. Editorial Hidrotécnica.
- Adiveter, S. (2013). *Manual de calidad del agua: Parámetros y aplicaciones*. Editorial Hidrotécnica.
- Alcántara, E., Gómez, R., & Torres, F. (2010). *Influencia del relieve en la respuesta hidrológica de cuencas*. *Revista de Hidrología y Gestión de Cuencas*, 5(2), 112-120.
- Bedient, P. B., & Huber, W. C. (2002). *Hydrology and Floodplain Analysis* (3rd ed.). Prentice Hall.
- Baldeon, M., García, S., & López, C. (2016). *Indicadores morfométricos en la hidrología de cuencas*. Editorial Académica.
- Brown, L. E., Hannah, D. M., & Milner, A. M. (2003). *Alpine stream habitat classification: an alternative approach incorporating the role of dynamic water-source contributions*. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(3), 313-322.
- Caissie, D. (2006). *The thermal regime of rivers: a review*. *Freshwater Biology*, 51(8), 1389-1406.
- Camino, MA, Bó, MJ, Cionchi, JL, Del Río, JL, López de Armentia, A., & De Marcos, SG (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje del vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires.
- Camones, R. (2018). *Análisis morfométrico de cuencas hidrográficas: Una visión práctica*. Editorial Académica.
- Camones, R. (2018). *Morfometría aplicada a la gestión de cuencas hidrográficas*. Editorial Andina.
- Carvallo, J., & Delgado, M. (2020). *Altimetría y su aplicación en la gestión de cuencas hidrográficas*. Editorial Hidroamérica.
- Chapman, D. (1996). *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* (2nd ed.). E & FN Spon.
- Chester, D., Scott, P., & Hurni, H. (2017). *Hydrological Behavior of Different Watershed Shapes*. *Environmental Hydrology Journal*, 12(3), 34-45.

- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Conzonno, V. (2012). *Química del agua: Parámetros físicoquímicos*. Editorial Hidroambiente.
- Cruz, F. (1980). *Estudio geomorfológico del Lago de Yojoa*. Editorial Técnica.
- Cruz, R., Hernández, M., & Lara, S. (2015). *Redes de drenaje en cuencas hidrográficas: Técnicas de análisis y aplicaciones*. Editorial Técnica.
- Demetrio, L. (2016). *Hidrología de cuencas: Caracterización y análisis de redes de drenaje*. Editorial Universitaria.
- Dunne, T., & Leopold, L. B. (1978). *Water in Environmental Planning*. W.H. Freeman and Company.
- FAO. (2011). *Manejo de microcuencas: Guía técnica para la sostenibilidad hídrica*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ferrera, J. (2023). *Balance hídrico en cuencas: Técnicas de evaluación y gestión*. Editorial del Agua.
- Flores, J. (2011). *Hidrología aplicada a la gestión de cuencas hidrográficas*. Editorial Técnica.
- Gálvez, R., & Riveros, J. (2012). *Dinámica de los recursos hídricos: Interacciones entre cuerpos de agua y acuíferos*. Editorial Ambiental.
- García, M. (2019). *Química del agua: Propiedades y reacciones*. Editorial Técnica.
- Gaspari, P., Lombaida, R., & Cruz, M. (2015). *Modelación hidrológica de cuencas: Técnicas y aplicaciones*. Editorial Hidroediciones.
- Gutiérrez, A. (2007). *Hidrología y geomorfología de cuencas: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Técnica.
- Gutiérrez, A. (2007). *Representación gráfica en la morfometría de cuencas*. Editorial Académica.
- Hernández, J., Ramírez, L., & Cruz, M. (2021). *Métodos de determinación de la pendiente media en cuencas hidrográficas*. Editorial Técnica.
- House, J., Pérez, R., & López, M. (2003). *Impacto de la actividad volcánica en la formación del Lago de Yojoa*. Editorial Universitaria.
- Horton, R. E. (1945). *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. Geological Society of America Bulletin, 56(3), 275-370.

- Illescas, R. (2016). *Análisis hipsométrico y su aplicación en la morfometría de cuencas*. Editorial Universitaria.
- Johnson, S. L. (2004). *Factors influencing stream temperatures in small streams: substrate effects and a shading experiment*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 61(6), 913-923.
- Lombaida, R. (2020). *Análisis morfométrico y su aplicación en la gestión de cuencas*. Editorial Técnica.
- Lombaida, R. (2020). *Gestión de Recursos Hídricos: Aplicaciones en Cuencas Hidrográficas*. Editorial Técnica.
- López, R., Martínez, J., & García, M. (2021). *Evaluación fisicoquímica de microcuencas en regiones montañosas*. Editorial Académica.
- Madrid, P. (2022). *Hidrología de cuencas endorreicas: Características y desafíos*. Editorial Hidroambiente.
- Meneghini, A. (2020). *Impacto de la temperatura en los ecosistemas acuáticos*. Editorial Ambiental.
- Moore, R. D., Spittlehouse, D. L., & Story, A. (2005). *Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: a review*. Journal of the American Water Resources Association, 41(4), 813-834.
- Neiff, J. J. (2001). *Humedales de Iberoamérica: Ecología y conservación*. Editorial Universitaria.
- Ortiz, M. (2016). *Análisis morfométrico en cuencas hidrográficas: Metodología y aplicaciones*. Editorial Universitaria.
- Paz, J., López, C., & Rodríguez, M. (2014). *El ciclo hidrológico y su influencia en los cuerpos de agua*. Editorial Universitaria.
- Periman, A. (2008). *Gestión y conservación de lagos: Un enfoque integral*. Editorial Ecovida.
- Poole, G. C., & Berman, C. H. (2001). *An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation*. Environmental Management, 27(6), 787-802.
- Quesada, M., & Barrantes, G. (2017). *Geomorfometría aplicada a la gestión de cuencas*. Editorial Académica.
- Ramsar. (2005). *Information Sheet on Ramsar Wetlands (RIS) - Lago de Yojoa*. Recuperado de

[https://rsis Ramsar.org/RISapp/files/RISrep/HN1467RISformer\\_160210.pdf](https://rsis Ramsar.org/RISapp/files/RISrep/HN1467RISformer_160210.pdf)

- Ramírez, J., Torres, F., & Ruiz, M. (2015). *Parámetros morfométricos aplicados a la gestión de cuencas*. Editorial Universitaria.
- Ricce, J., & Robles, F. (2014). *Geometría y morfometría de cuencas hidrográficas: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Universitaria.
- Rodríguez Martínez, J., & Gómez, P. (2018). *Análisis de la torrencialidad en cuencas hidrográficas*. Editorial Técnica.
- Sánchez, M. (2023). *Gestión del agua en cuencas endorreicas: Desafíos y soluciones*. Editorial Hidroamérica.
- Smith, A. (2015). *Fisicoquímica del agua: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial Académica.
- Smith, J. (2020). *Hidrología aplicada a la gestión de riesgos en cuencas torrenciales*. Editorial Hidroambiente.
- Strahler, A. N. (1957). *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. Transactions, American Geophysical Union, 38(6), 913-920.
- Studer, M. (2007). *Estudio geomorfológico del Lago de Yojoa*. Editorial Técnica.
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1995). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- Tacusi, R., & Hacha, J. (2015). *Geometría de cuencas y su influencia en la hidrología*. Editorial Andina.
- Tacusi, R., & Hacha, J. (2020). *Geometría de cuencas y su influencia en la hidrología*. Editorial Andina.
- Torres, F., & Téllez, J. (2016). *Análisis altimétrico de cuencas hidrográficas*. Editorial Técnica.
- Torres, F., & Téllez, J. (2016). *Evaluación morfométrica y su aplicación en la gestión de cuencas*. Editorial Universitaria.
- Vannote, R. L., Minshall, G. W., Cummins, K. W., Sedell, J. R., & Cushing, C. E. (1980). *The river continuum concept*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 37(1), 130-137.
- Vaux, J., Hernández, A., & Pérez, L. (1993). *Análisis geomorfológico del valle del Lago de Yojoa*. Editorial Académica.

- Webb, B. W., Clack, P. D., & Walling, D. E. (2008). *Rivers, lakes, and groundwater: empirical estimation of stream temperature response to environmental change*. Hydrological Sciences Journal, 53(1), 77-88.
- Zabala, M. (2016). *Estudios hipsométricos en la evaluación de cuencas hidrográficas*. Editorial Académica.
- Zambrana, A. (2008). *Evaluación de recursos naturales en cuencas hidrográficas*. Editorial Andina.

## IX. ANEXOS

Anexos 1 Registro de muestra y parámetros fisicoquímicos de las microcuencas tributarias del Lago de Yojoa Honduras

.

| N.º | Fecha | pH | Temperatura ° C | Conductividad Eléctrica µs/cm | Observaciones |
|-----|-------|----|-----------------|-------------------------------|---------------|
| 1   |       |    |                 |                               |               |
| 2   |       |    |                 |                               |               |
| 3   |       |    |                 |                               |               |
| 4   |       |    |                 |                               |               |
| 5   |       |    |                 |                               |               |
| 6   |       |    |                 |                               |               |