

Comportamiento térmico de un embalse insular tropical (Embalse Hatillo, República Dominicana)

Thermal behavior of a tropical island reservoir (Hatillo Reservoir, Dominican Republic)

William López^{1*} , Jorge Cuartas¹ 

Resumen

Este trabajo se desarrolló con el fin de identificar el patrón de estratificación y mezcla en el embalse Hatillo, el más grande de las Antillas Mayores y el de mayor capacidad de almacenamiento de agua en la República Dominicana, construido en 1984 en la cuenca baja del río Yuna para generación de energía eléctrica, distrito de riego y control de inundaciones. Se recopilaron 52 perfiles verticales diurnos de temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y pH tomados en la zona limnética del embalse desde el año 2011 hasta el 2021. Se establece la mezcla cuando la diferencia entre la temperatura superficial y la de fondo es inferior a 1 °C, es decir gradientes inferiores a 0,06 °C por metro, valores totales de Resistencia Termal Relativa (RTR) a la mezcla, menores a 40, es decir menores a 1,8 por metro. El seguimiento térmico realizado por diez años ha permitido establecer que las masas de agua del embalse permanecen estratificadas térmicamente la mayor parte del año, con eventos de mezcla de frecuencia anual con duración de un mes entre diciembre y marzo, de manera que se define como un Lago Monomíctico Cálido según la revisión que hizo Lewis Jr. (1983a) a la clasificación de Hutchinson y Löffler (1956).

Palabras clave: embalse, isla tropical, patrones de mezcla, RTR

Abstract

This work was developed to identify the stratification and mixing pattern in the Hatillo reservoir, the largest reservoir in the Greater Antilles and the reservoir with the greatest water storage capacity in the Dominican Republic, built in 1984 in the lower basin of the Yuna River for electric power generation, irrigation district and flood control. Fifty-two diurnal vertical profiles of temperature, electrical conductivity, dissolved oxygen and pH in the limnetic zone of the reservoir from 2011 to 2021 were collected. Mixing is established when the difference between surface and bottom temperature is less than 1 °C, that is, gradients less than 0.06 °C per meter, total values of Relative Thermal Resistance to Mixing-RTR less than 40, that is, less than 1.8 per meter. The thermal monitoring carried out for ten years has allowed us to establish that the water masses of the reservoir remain thermally stratified most of the year, with annual mixing events lasting one month between December and March. The Hatillo reservoir is defined as a Warm Monomictic Lake according to the revision made by Lewis Jr. (1983a) to the classification of Hutchinson y Löffler (1956).

Keywords: mixed patterns, reservoir, RTR, tropical island

¹Ecoyaco SAS, Bogotá, Colombia.

*Autor de correspondencia: william.lopez@ecoyaco.org

Recibido: agosto 15, 2023; aceptado: abril 18, 2024; publicado: junio, 21, 2024.

INTRODUCCIÓN

La importancia del conocimiento de variables como la temperatura y el oxígeno disuelto en los ecosistemas lacustres radica fundamentalmente en que estos factores influyen sobre la mayoría de los procesos orgánicos e inorgánicos dentro del cuerpo de agua, jugando un importante papel en la intensidad de los procesos fisicoquímicos, la remineralización de la materia orgánica y liberación de nutrientes y metales desde los sedimentos (Bostrom et al., 1988; Chang et al., 2021; Christianson et al., 2020, Harris, 1999; Lewis Jr., 2000; Roldán & Ramírez, 2008; Wang et al., 2019).

La estratificación térmica es el factor hidroclimatológico más importante que dirige los procesos biológicos en los ecosistemas lacustres, ya que las diferencias de densidad definen la profundidad de mezcla vertical y ésta a su vez regula la distribución de los iones y las partículas en suspensión, lo que implica la distribución de nutrientes y la productividad (Branco et al., 2009; Melack, 1979). Para lagos templados, la estratificación térmica se define cuando en la columna de agua se alcanza una diferencia de 1 °C por cada metro (Cole, 1988; Wetzel, 1981), sin embargo, en ecosistemas tropicales diferencias térmicas de menos de 2 °C entre la superficie y el fondo a elevadas temperaturas cercanas a los 24 °C, pueden provocar suficiente diferencia de densidad como para generar estratificación estable (Branco et al., 2009; Lewis Jr., 1996; 2000).

Hay cuatro escalas de tiempo principales en las variaciones de estratificación de los lagos: las interanuales, las anuales, las intra-anuales y las diurnas o nictamerales (Richerson, 1991).

Hutchinson y Löffler (1956) elaboraron una clasificación de seis tipos de lagos basada en los patrones anuales de mezcla, quienes preveían que los lagos tropicales de tierras bajas deberían ser oligomícticos, es decir con períodos de mezcla con frecuencia superior al año, mientras que los de altas altitudes serían polimícticos, es decir permanentemente mezclados.

Aunque esta clasificación tuvo algunos ajustes en la medida en que se fueron conociendo datos de lagos tropicales (Lewis Jr., 1973; 1983b; Löffler,

1964; 1968), fue solo hasta cuando Lewis Jr. (1983a) hizo una revisión que permitió incorporar los lagos tropicales someros, los lagos meromícticos o con mezclas incompletas y los lagos fríos con temperaturas próximas a los 4 °C, definiendo ocho clases de lagos según el tipo de mezcla.

Richerson (1991) y Lewis Jr. (1996), plantean que aunque existen muy pocos datos a largo plazo para los lagos tropicales, hay muy poca diferencia entre los lagos tropicales con suficiente profundidad como para estratificarse con los lagos subtropicales o templados, en la medida en que estos parecen mostrar un fuerte grado de repetición en la estacionalidad de la mezcla anual predecible en un período particular del año, la diferencia es que el período de mezcla en los lagos tropicales puede ser tan corto como un mes o seis semanas.

En este trabajo se presenta por primera vez el análisis de registros a largo plazo (diez años) de temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica en un embalse tropical insular, obteniendo información que permite complementar la revisión de la clasificación de los lagos basada en los patrones de mezcla que hizo Lewis Jr. (1983a).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La República Dominicana está ubicada en la subregión de América media insular, en las grandes Antillas Caribeñas, se localiza entre las latitudes 17°00′-20°00′ N y las longitudes 68°71′-72°00′ W, con una extensión de 48.670,82 km² ocupa las dos terceras partes de la Isla La Española, que comparte con la República de Haití (Oficina Nacional de Planificación y Desarrollo Educativo [ONAPLAN], 2000).

El embalse Hatillo localizado en la provincia Sánchez Ramírez (figura 1), se construyó en 1984 para almacenar agua con fines de generación de energía eléctrica y distrito de riego, además de cumplir una importante función en el control de inundaciones en la cuenca baja del río Yuna (Gómez-Achecar, 1997). En la tabla 1 se resumen las principales características morfo métricas e hidráulicas del embalse, así como la profundidad y transparencia en el punto de toma de registros en la zona limnética del embalse.

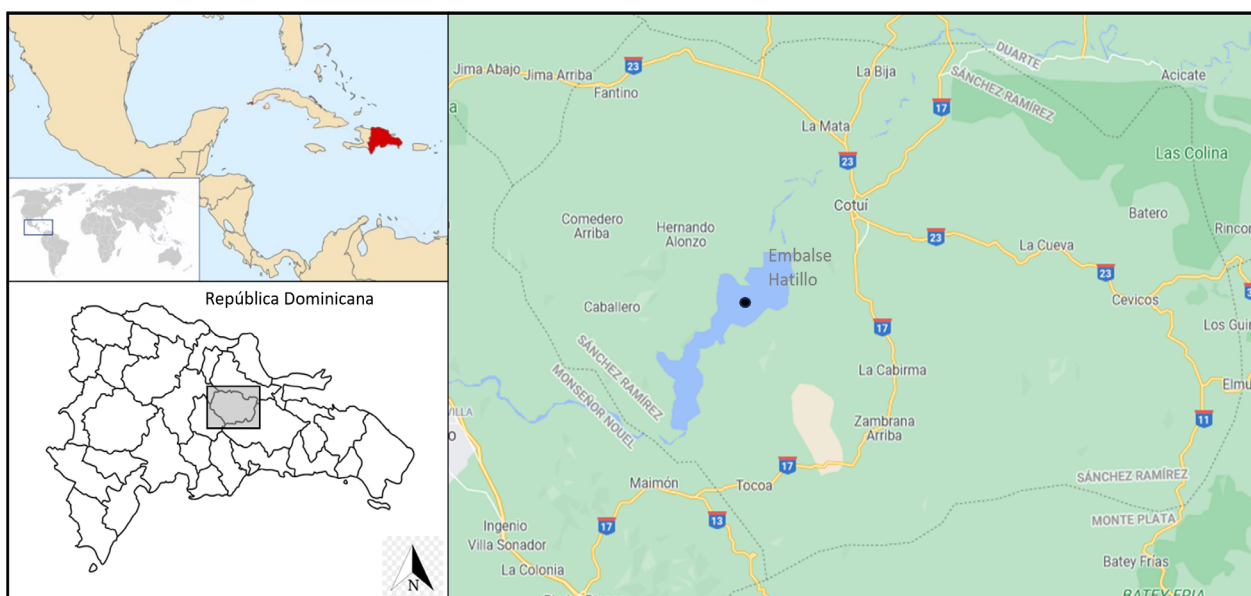


Figura 1. Localización geográfica del embalse Hatillo. Se señala en negro la ubicación aproximada del punto de muestreo.

Tabla 1. Principales características del embalse Hatillo

| Características | Valor | Unidad | Fuente |
|--------------------------------|-----------|-----------------|-------------------------------|
| Altitud | 88 | msnm | Guzmán et al., (2013) |
| Superficie máxima | 50 | km ² | |
| Volumen máximo | 710 | hm ³ | |
| Caudal promedio de entrada | 63,21 | m ³ | |
| Profundidad total | 14,1-28 | m | Registros <i>in situ</i> |
| Profundidad Secchi | 0,8 - 4,0 | m | |
| Longitud máxima | 10,5 | km | Medida cartográfica |
| Ancho máximo | 3,5 | km | |
| Ancho medio | 4,8 | km | Calculada según Wetzel (1981) |
| Profundidad media | 14,2 | m | |
| Profundidad relativa | 0,35 | % | |
| Tiempo de retención hidráulica | 0,36 | años | |

La cuenca del río Yuna, considerado el río más caudaloso de la República Dominicana, cubre una superficie de 2905,49 km² (Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo [MEPYD], 2018). Los mayores caudales de entrada del río Yuna al embalse Hatillo se presentan en los meses de mayo, junio, noviembre y diciembre (figura 2; Bautista de los Santos, 2014).

Se distingue un período seco desde diciembre hasta

marzo con precipitación media mensual entre 37 y 49 mm, temperatura media de 23,9-24,1 °C, mínima de 20,3-21,2 °C y máxima de 27,7-28,5 °C. El período lluvioso va desde mayo hasta octubre con precipitación media mensual de 120 a 137 mm, temperatura media 25,5-26,4 °C, mínima de 22,5-23,6 °C y máxima de 29,2-30,2 °C (figura 3). Los meses de noviembre y marzo serían transicionales entre los dos períodos climáticos (Climate-Data, 2023).

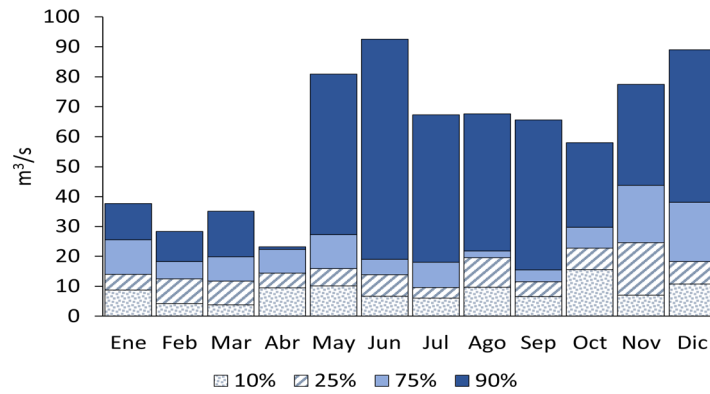


Figura 2. Porcentajes promedio multianuales de recurrencia (1950-1999) de caudales del río Yuna a la entrada del embalse Hatillo.

Recolecta y análisis de información

Para la definición del comportamiento térmico del embalse Hatillo, se recopilaron 52 registros diurnos de temperatura tomados en la zona limnética del embalse (19°0'12''N y 70°12'44''W; figura 1) desde

febrero de 2011 hasta julio de 2021 como parte del programa de monitoreo ambiental de la mina Pueblo Viejo (RESCAN, 2004; 2005; 2008). Las mediciones se hicieron entre las 6:00 am y 7:00 am utilizando sondas multiparamétricas YSI-556 y YSI-EXO 2016 con sensores debidamente

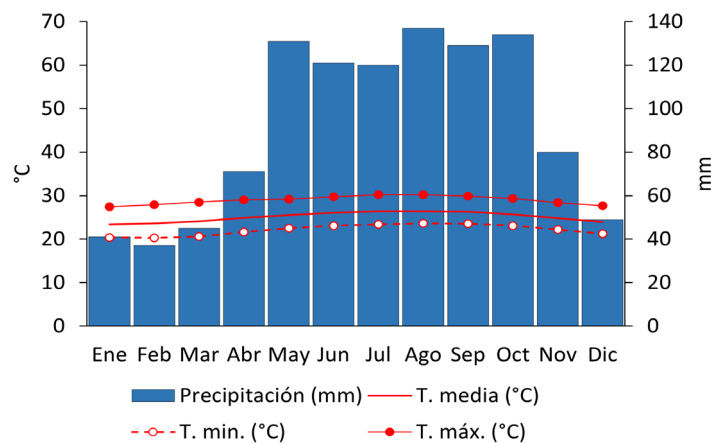


Figura 3. Promedios mensuales multianuales (1991-2021) de precipitación, temperatura media, máxima y mínima en el Aeropuerto de Cibao (República Dominicana).

calibrados de temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y pH.

Para evaluar la presencia e intensidad de la estratificación térmica en el embalse se utilizó la Resistencia Termal Relativa (RTR) a la mezcla, que se basa en las diferencias de densidad generadas por los gradientes térmicos entre masas de agua adyacentes, pudiendo identificar la localización e intensidad de la termoclina según el pico de RTR (Cole, 1988; Kortmann, 2003; Wetzel, 1981).

Como criterios para definir condiciones de mezcla del embalse se consideró que la diferencia entre la temperatura superficial y la de fondo no fuera superior a 1 °C teniendo en cuenta lo planteado por Basak y Sarkar (2006), así como obtener valores de RTR menores a 20 entre capas adyacentes de

1 m de profundidad, que como plantea Kortmann (2003) valores superiores ya generan resistencia a la mezcla de las masas de agua adyacentes.

RESULTADOS

Dinámica temporal

Durante los diez años de seguimiento en el embalse Hatillo se han registrado mayores temperaturas en las aguas superficiales, con valores entre 25,08 °C y 30,88 °C, mientras que en el fondo han estado entre 23,26 °C y 28,51 °C. Los meses de diciembre y enero son los meses del año con las menores temperaturas superficiales y las menores diferencias térmicas entre la superficie y el fondo, de manera que son los períodos en los que es posible la mezcla de las

masas de agua del embalse, mientras que el resto del tiempo las diferencias de densidad generadas

por las diferencias térmicas favorecen la presencia de estratificación térmica (tabla 2).

Tabla 2. Temperatura del agua, gradientes térmicos y valores de Resistencia Termal Relativa (RTR) en el embalse Hatillo desde febrero de 2011 hasta julio de 2021

| Muestreo | Profundidad (m) | Temperatura (°C) | | | °C/m | Resistencia Termal Relativa (RTR) | |
|----------|-----------------|------------------|------------|-------|-------|-----------------------------------|-----------|
| | | Superficie (Ts) | Fondo (Tf) | Ts-Tf | | Total | Por metro |
| feb 11 | 17 | 26,11 | 24,74 | 1,37 | 0,081 | 44 | 2,6 |
| abr 11 | 17 | 28,09 | 26,00 | 2,09 | 0,123 | 70 | 4,1 |
| jun 11 | 21,42 | 30,10 | 25,21 | 4,89 | 0,228 | 168 | 7,8 |
| ago 11 | 20 | 28,77 | 26,01 | 2,76 | 0,138 | 94 | 4,7 |
| dic 11 | 16 | 27,07 | 26,48 | 0,59 | 0,037 | 20 | 1,2 |
| may 12 | 20,8 | 29,82 | 24,50 | 5,32 | 0,256 | 179 | 8,6 |
| jun 12 | 21,2 | 30,03 | 24,78 | 5,25 | 0,248 | 178 | 8,4 |
| ene 13 | 20,3 | 25,86 | 24,80 | 1,06 | 0,052 | 34 | 1,7 |
| mar 13 | 19,4 | 27,96 | 26,12 | 1,84 | 0,095 | 62 | 3,2 |
| may 13 | 19,1 | 29,57 | 27,05 | 2,52 | 0,132 | 88 | 4,6 |
| jul-13 | 20,9 | 28,68 | 25,66 | 3,02 | 0,144 | 102 | 4,9 |
| oct 13 | 21,9 | 29,57 | 28,21 | 1,36 | 0,062 | 48 | 2,2 |
| ene 14 | 21,7 | 26,07 | 25,90 | 0,17 | 0,008 | 6 | 0,3 |
| abr 14 | 20 | 28,90 | 25,86 | 3,04 | 0,152 | 103 | 5,2 |
| jul 14 | 19,4 | 30,19 | 28,50 | 1,69 | 0,087 | 61 | 3,1 |
| nov 14 | 18,2 | 29,55 | 28,51 | 1,04 | 0,057 | 37 | 2,0 |
| ene 15 | 14,9 | 26,04 | 25,85 | 0,19 | 0,013 | 6 | 0,4 |
| abr 15 | 17,1 | 27,21 | 26,18 | 1,03 | 0,060 | 34 | 2,0 |
| ene 16 | 17,4 | 26,66 | 26,48 | 0,18 | 0,010 | 7 | 0,4 |
| jul 16 | 19 | 30,05 | 27,05 | 3,00 | 0,158 | 110 | 5,8 |
| oct 16 | 20,2 | 29,00 | 27,62 | 1,38 | 0,068 | 50 | 2,5 |
| dic 16 | 21 | 27,40 | 25,8 | 1,6 | 0,076 | 53 | 2,5 |
| ene 17 | 21,2 | 25,52 | 24,11 | 1,41 | 0,067 | 44 | 2,1 |
| abr 17 | 21,7 | 27,81 | 23,69 | 4,12 | 0,190 | 132 | 6,1 |
| jul 17 | 21,7 | 29,36 | 25,13 | 4,23 | 0,195 | 155 | 7,1 |
| ago 17 | 21,8 | 30,77 | 25,66 | 5,13 | 0,235 | 179 | 8,2 |
| oct 17 | 22 | 29,67 | 26,62 | 3,05 | 0,139 | 106 | 4,8 |
| ene 18 | 21,9 | 26,91 | 26,40 | 0,51 | 0,023 | 19 | 0,9 |
| feb 18 | 23,001 | 25,08 | 23,26 | 1,82 | 0,079 | 67 | 2,9 |
| abr 18 | 21,1 | 27,04 | 23,36 | 3,68 | 0,174 | 135 | 6,4 |
| jul 18 | 21,1 | 30,34 | 26,11 | 4,23 | 0,200 | 155 | 7,3 |
| oct 18 | 18,6 | 29,77 | 28,00 | 1,77 | 0,095 | 65 | 3,5 |
| ene 19 | 20,6 | 26,3 | 25,81 | 0,49 | 0,024 | 18 | 0,9 |
| abr 19 | 17,5 | 27,63 | 26,43 | 1,2 | 0,069 | 44 | 2,5 |
| jun 19 | 18,1 | 28,00 | 26,58 | 1,43 | 0,079 | 52 | 2,9 |
| jul 19 | 16 | 30,88 | 27,23 | 3,65 | 0,228 | 134 | 8,3 |
| oct 19 | 14,1 | 29,57 | 26,82 | 2,75 | 0,195 | 101 | 7,1 |
| dic 19 | 15,2 | 27,97 | 27,63 | 0,34 | 0,023 | 13 | 0,8 |

| Muestreo | Profundidad (m) | Temperatura (°C) | | | °C/m | Resistencia Termal Relativa (RTR) | |
|----------|-----------------|------------------|------------|-------|-------|-----------------------------------|-----------|
| | | Superficie (Ts) | Fondo (Tf) | Ts-Tf | | Total | Por metro |
| feb 20 | 17,8 | 26,72 | 25,31 | 1,41 | 0,079 | 52 | 2,9 |
| abr 20 | 22,8 | 27,91 | 23,59 | 4,32 | 0,189 | 158 | 6,9 |
| jul 20 | 18 | 30,4 | 28,17 | 2,23 | 0,124 | 82 | 4,5 |
| ago 20 | 19 | 29,63 | 27,27 | 2,36 | 0,124 | 86 | 4,5 |
| sep 20 | 20 | 29,71 | 27,10 | 2,61 | 0,131 | 95 | 4,8 |
| oct 20 | 17 | 29,21 | 27,52 | 1,69 | 0,099 | 62 | 3,6 |
| nov 20 | 22 | 27,92 | 26,84 | 1,073 | 0,049 | 39 | 1,8 |
| dic 20 | 18 | 26,96 | 26,75 | 0,21 | 0,012 | 8 | 0,4 |
| ene 21 | 19 | 26,20 | 25,94 | 0,26 | 0,014 | 10 | 0,5 |
| feb 21 | 19 | 26,36 | 25,82 | 0,54 | 0,028 | 20 | 1,0 |
| abr 21 | 19 | 26,67 | 26,02 | 0,65 | 0,034 | 24 | 1,3 |
| may 21 | 19 | 28,86 | 25,20 | 3,66 | 0,193 | 134 | 7,0 |
| jun 21 | 19 | 28,74 | 25,62 | 3,12 | 0,164 | 114 | 6,0 |
| jul 21 | 22 | 29,36 | 25,82 | 3,54 | 0,161 | 144 | 6,6 |

Se resaltan los meses de mezcla

Durante los meses en los que se presentaron mezclas de las masas de agua, los gradientes térmicos entre la superficie y el fondo estuvieron entre 0,17 °C y 1,07 °C, es decir menos de 0,06 °C/m. Estas diferencias térmicas arrojaron valores totales de RTR desde 6 hasta 39 unidades, es decir desde 0,3 hasta 2,0 unidades por metro, mientras que, en el resto del año, en condiciones de estratificación térmica, su gradiente desde la superficie hasta el fondo estuvo entre 1,2 °C y 5,32 °C, es decir desde 0,06 °C/m hasta 0,26 °C/m, lo que arrojó valores totales de RTR entre 44 y 179 unidades, que corresponde a un rango entre 2,1 y 8,6 unidades

por metro (figura 4).

Las mayores concentraciones de oxígeno también se han presentado en la superficie de la columna de agua, con promedio de 7,3 mg/L, mientras que el promedio en el fondo es de 2,9 mg/L, cuyas mayores concentraciones de oxígeno en el fondo y menores diferencias con los registros superficiales también se presentaron en los meses con mezcla de las masas de agua. Las aguas superficiales también presentaron mayor pH con valores entre 6,7 y 9,5 unidades, a su vez en el fondo del embalse se obtuvo un valor mínimo de 6,1 y máximo de 9,0 unidades.

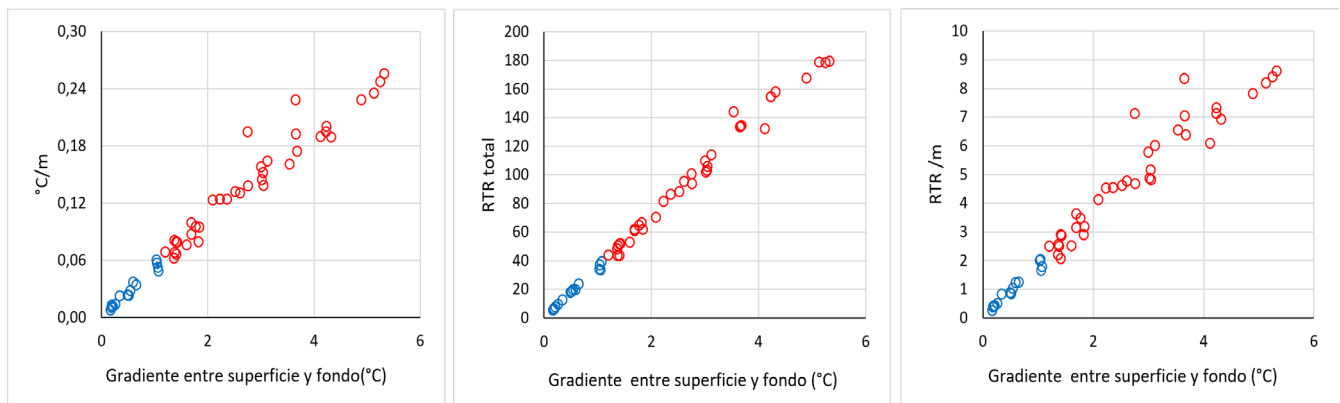


Figura 4. Variación de la temperatura por metro y la Resistencia Termal Relativa en relación con el gradiente térmico entre la superficie y el fondo del embalse Hatillo desde febrero de 2011 hasta julio de 2021. Se muestra en azul la Mezcla y en rojo la estratificación.

Semejante a lo observado con la temperatura y el oxígeno disuelto, en los meses de diciembre y enero se obtuvieron las menores diferencias de pH entre la superficie y el fondo de la columna de agua (figura 5).

La conductividad eléctrica en el embalse ha presentado valores entre 193 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 481 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con muy poca diferencia entre la superficie y el fondo, con respectivos valores promedio de 339 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 332 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A diferencia de lo observado

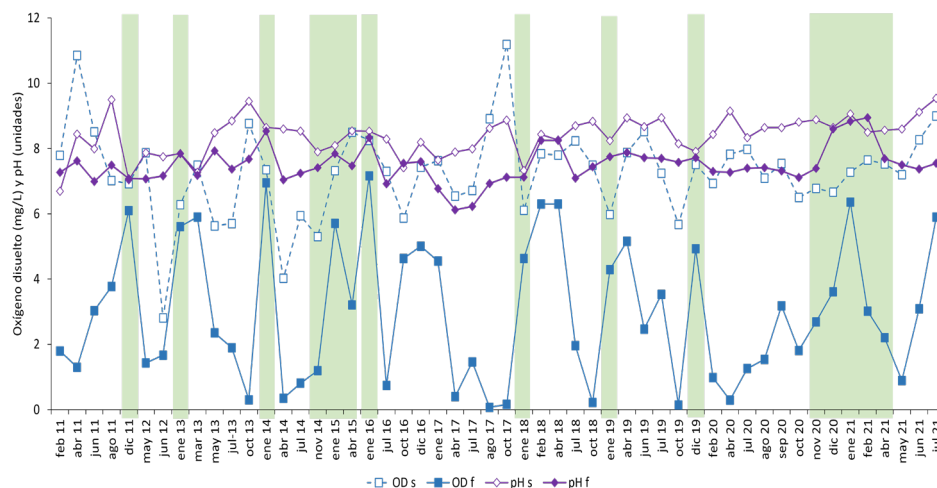


Figura 5. Concentración de oxígeno disuelto (OD mg/L) y pH (unidades) del agua en la superficie (s) y en el fondo (f) del embalse Hatillo desde febrero de 2011 hasta julio de 2021. Se resaltan los meses de mezcla.

con las variables antes comentadas, las variaciones entre las aguas superficiales y profundas no presentaron relación con los procesos de mezcla de las masas de agua del embalse.

Perfiles verticales

Como se observa en la figura 6, a lo largo de los diez años de estudio, las masas de agua del embalse

permanecieron estratificadas térmicamente la mayor parte del año, con presencia de eventos de mezcla entre diciembre y marzo de cada año. A continuación, se describen los perfiles verticales de tres momentos notables para cada una de las condiciones de mezcla (enero de 2013, noviembre de 2020, abril de 2021) y estratificación térmica del embalse (junio de 2012, enero de 2017, mayo 2021).

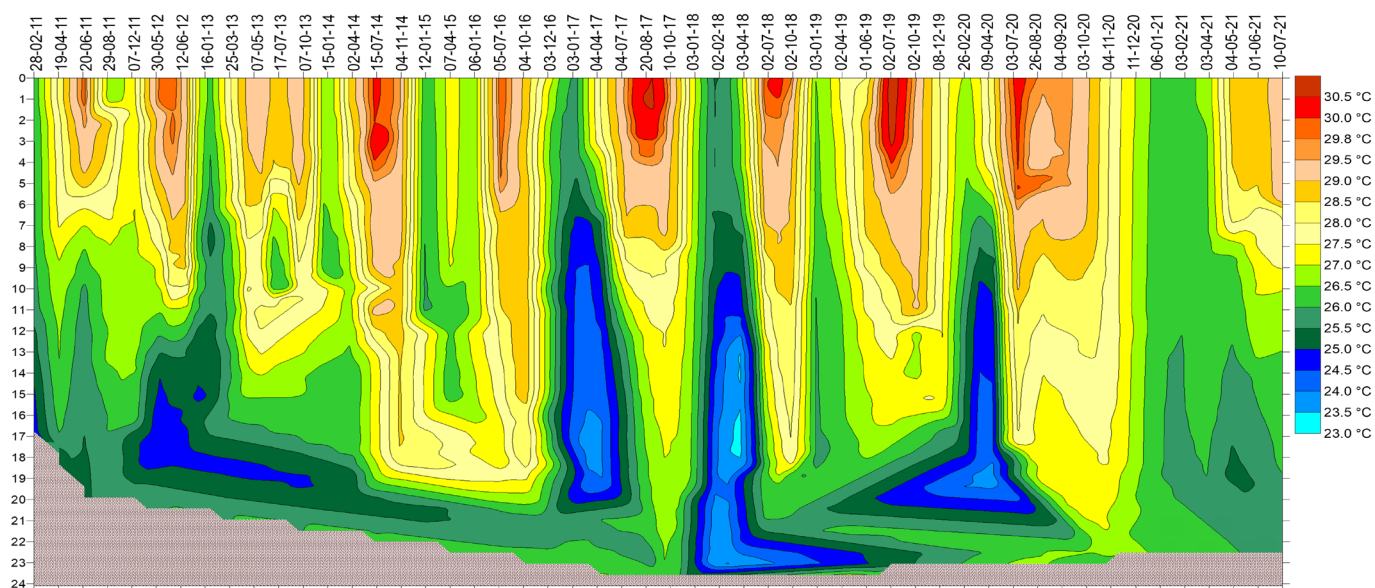


Figura 6. Isolíneas de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) obtenidas en el centro del embalse El Hatillo desde febrero de 2011 hasta diciembre de 2021.

De todos los períodos de mezcla, el de enero de 2013 fue el que presentó la mayor diferencia entre la superficie y el fondo, cuando en las aguas superficiales se registraron 25,86 °C y en el fondo 24,8 °C, con un gradiente de 0,05 °C/m, cuyas variaciones de densidad entre las capas adyacentes arrojaron valores de RTR menores de 16 hasta 17, que correspondieron a 1,7 unidades por metro. Para el año 2020, la mezcla de las masas de agua se hizo evidente desde noviembre, con gradiente

térmico de 0,049 °C/m, cuyo perfil estuvo entre 27,92 °C y 26,84 °C, con RTR máximo de 12 entre los 18 y 19 m de profundidad, es decir 1,8 por metro. Este período de mezcla se prolongó hasta abril de 2021, cuando la temperatura fue de 26,67 °C en la superficie con ligera reducción al aumentar la profundidad, hasta alcanzar un mínimo de 26,02 °C en el fondo, cuyo mayor valor de RTR de cinco se presentó a los 4-5 metros de profundidad (figura 7).

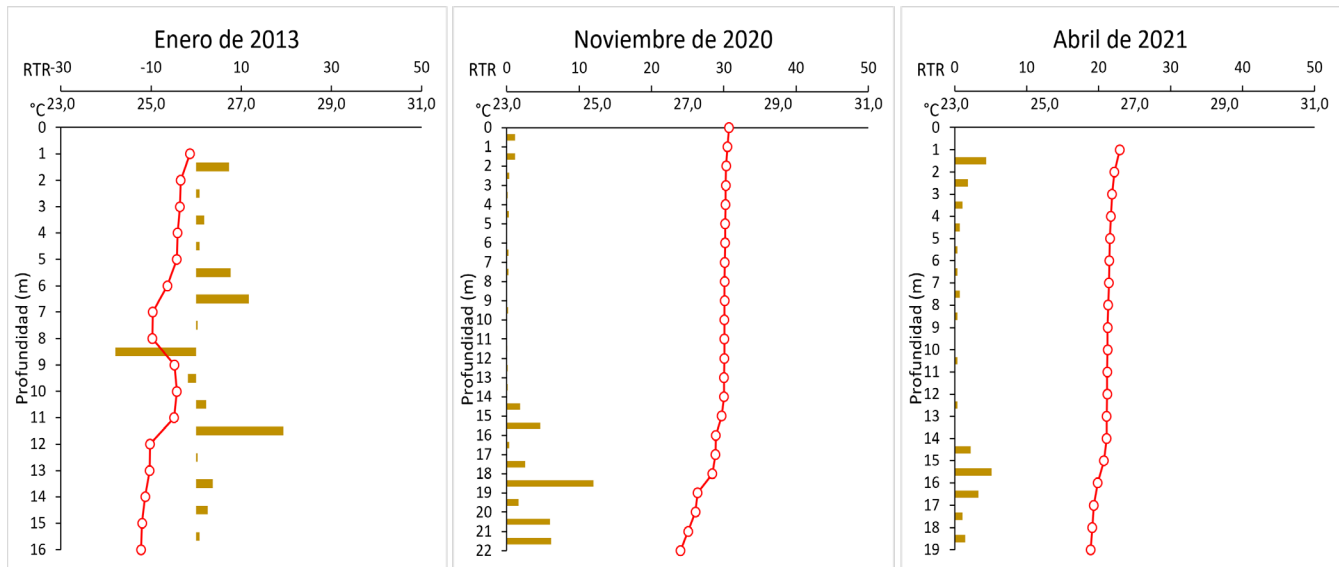


Figura 7. Perfiles térmicos y Resistencia Termal Relativa (RTR) en el embalse Hatillo en tres momentos de condiciones de mezcla entre febrero de 2011 y julio de 2021.

En enero de 2013 el oxígeno disuelto disminuyó desde 6,28 mg/L en la superficie hasta 5,61 mg/L en el fondo, semejante al perfil de la conductividad eléctrica con valores entre 264 μ S/cm superficiales y 262 μ S/cm al fondo de la columna de agua. El pH también mostró muy poca variación a lo largo del perfil con valores entre 7,76 y 7,85 unidades. En noviembre de 2020 el oxígeno disuelto mostró una continua reducción en su concentración desde 6,78 mg/L en la superficie hasta 3,18 mg/L a los 18 m y posterior incremento hasta 4,67 mg/L en el fondo. El perfil de conductividad eléctrica fue similar, con 458 μ S/cm en superficie, mínimo de 396 μ S/cm a los 21 m y ligero incremento hasta 410 μ S/cm en el fondo. El pH presentó muy poca variación en el perfil con 8,86 unidades en la superficie y 8,63 unidades en el fondo de la columna de agua. En abril de 2021 el oxígeno disuelto estuvo entre 7,53 mg/L y 8,34 mg/L hasta 15 m de profundidad, luego una fuerte reducción hasta obtener concentraciones entre 2,57 mg/L y 2,2 mg/L en la franja de 4 m del fondo de la columna de agua. El pH con muy poca variación en el perfil estuvo entre 8,88 unidades

en superficie y 8,56 en el fondo y la conductividad eléctrica estuvo entre 424 μ S/cm en la superficie y 432 μ S/cm en el fondo (figura 8).

En condiciones de estratificación térmica del embalse, el registro de junio de 2012 fue el de estratificación térmica más intensa. Los nueve metros superficiales de la columna de agua estuvieron entre 30,2 °C y 29,34 °C, luego la temperatura disminuyó hasta 25,65°C a los 13 m cuyos valores de RTR estuvieron entre 23 y 44, localizando allí la termoclina. Por debajo de esta capa hasta el fondo del embalse a los 18 m, la temperatura disminuyó hasta 24,78 °C, con valores de RTR menores a 10. Para este mes el gradiente térmico fue de 0,25 °C/m y la RTR total de 184, es decir 8,4 por metro. El registro de enero de 2017 se diferenció de los demás registros de enero por presentar estratificación térmica, en la medida que la temperatura superficial fue 25,52 °C y en el fondo de la columna de agua estuvo en 24,11 (0,07 °C/m), cuyo gradiente térmico arrojó una RTR total de 44 (2,1/m), localizando la termoclina

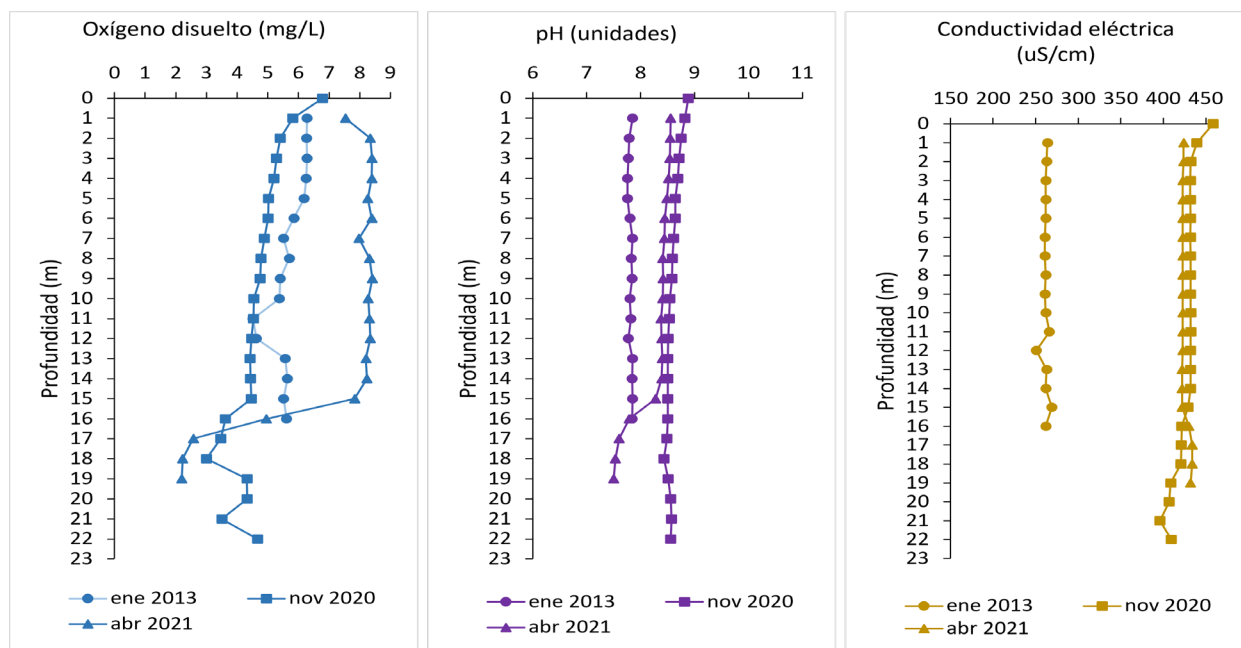


Figura 8. Perfiles de oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica en el embalse Hatillo en tres momentos de condiciones de mezcla entre febrero de 2011 y julio de 2021.

entre los 4 y 7 m de profundidad, franja en la que se alcanzó una RTR de 36. En mayo de 2021 la termoclina fue claramente identificable, es así como en los siete metros superficiales la temperatura disminuyó desde 28,86 °C hasta 28,07 °C. La termoclina, con gradiente térmico de 1,44 °C y RTR de 53, se localizó entre los 7 y 8 m de

profundidad de la columna de agua. A partir de los 8 m hasta el fondo, la temperatura disminuyó gradualmente desde 26,63 °C hasta 25,2 °C con valores de RTR menores a 11,3. Para este mes se obtuvo un gradiente térmico de 0,19 °C/m con RTR total de 134, es decir 7 unidades por metro (figura 9).

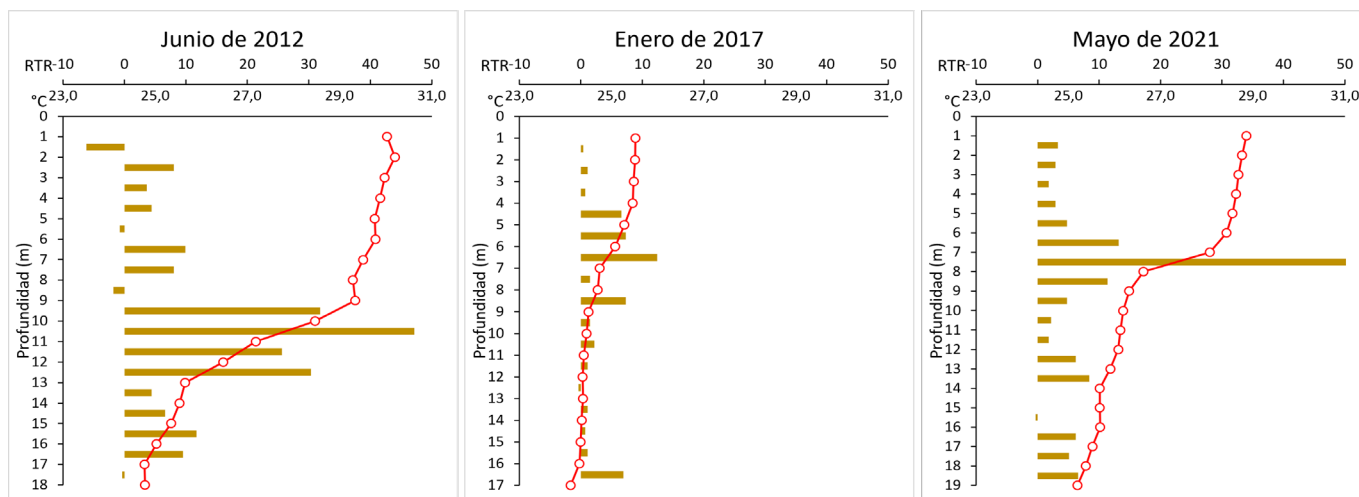


Figura 9. Perfiles térmicos y Resistencia Termal Relativa (RTR) en el embalse Hatillo en tres momentos de estratificación térmica entre febrero de 2011 y julio de 2021.

En junio de 2012 el perfil del oxígeno disuelto mostró suave disminución desde 2,81 mg/L en la superficie hasta 1,67 mg/L en el fondo. El pH estuvo entre 7,75 unidades en superficie y 7,26 unidades en el fondo, con un ligero incremento a los 3 m de profundidad, a su vez el perfil vertical

de la conductividad eléctrica estuvo entre 208 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 107 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un ligero incremento hasta 260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a los 13 m de profundidad (figura 10).

En enero de 2017 el oxígeno disuelto presentó disminución desde 7,63 mg/L en la superficie hasta

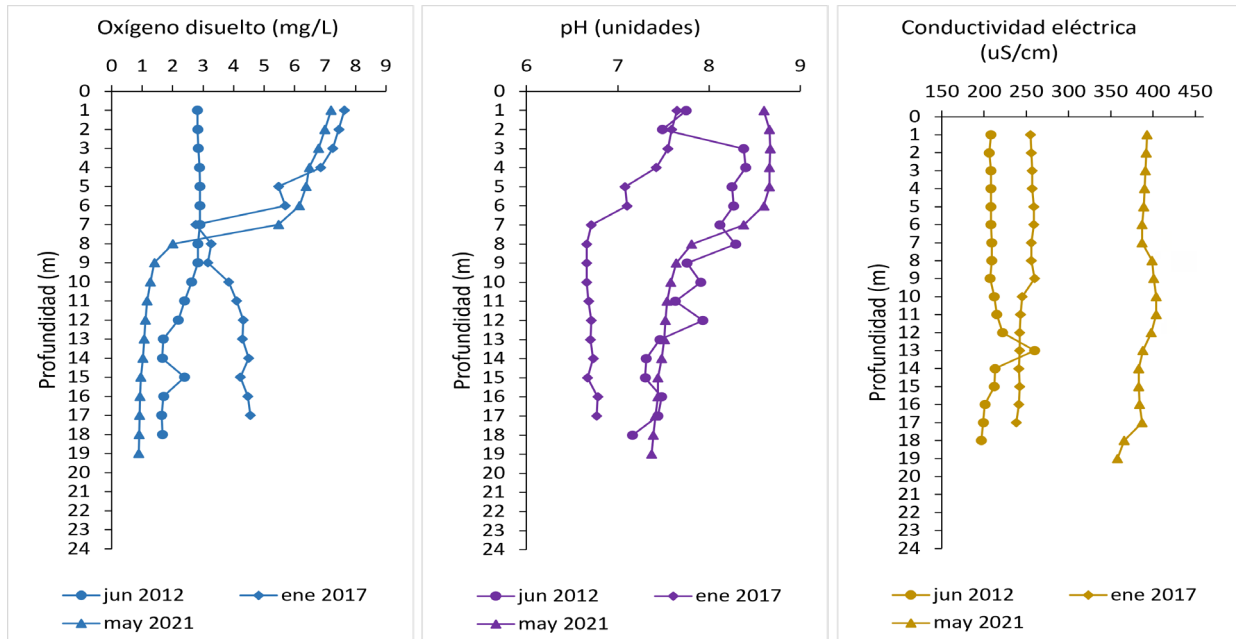


Figura 10. Perfiles de oxígeno disuelto, pH y conductividad eléctrica en el centro del embalse Hatillo en tres momentos de estratificación térmica entre febrero de 2011 y julio de 2021.

2,76 mg/L a los 7 m y posterior incremento hasta 4,55 mg/L en el fondo de la columna de agua. El pH también presentó un gradiente relacionado con la profundidad, con 7,65 unidades en la superficie y 6,77 unidades en el fondo de la columna de agua. La conductividad eléctrica a su vez presentó un perfil con ligera reducción desde 255 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la superficie hasta 238 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el fondo. El oxígeno disuelto en mayo de 2021 estuvo entre 7,2 mg/L y 5,47 mg/L en los siete metros superficiales, disminuyó a 2,01 mg/L a los 8 m y luego llegó hasta casi la anoxia en el fondo de la columna de agua. El perfil del pH presentó el mismo patrón clinógrado del oxígeno manteniéndose en 8,6 unidades hasta los 6 m, luego disminuyó hasta 7,81 unidades a los 8 m y continuó disminuyendo hasta el mínimo de 7,37 unidades en el fondo. La conductividad eléctrica por su parte disminuyó desde 393 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la superficie hasta 358 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el fondo de la columna de agua (figura 10).

DISCUSIÓN

Considerando que la temperatura superficial mínima registrada en el embalse Hatillo entre los años 2011 y 2021 fue de 25,08 °C y el promedio anual mínimo fue de 26,63 °C, este embalse puede definirse como un lago cálido tropical según los criterios indicados por Salas y Martino (2001). Si bien el embalse Hatillo responde a la mayoría de las generalizaciones descritas para lagos tropicales a nivel del mar, difiere en algunas de ellas tales

como la mínima temperatura del fondo de la columna de agua del embalse (23,3 °C) que fue ligeramente inferior al mínimo de 24 °C definido por Lewis Jr. (1996). Así mismo, la diferencia entre la superficie y el fondo en períodos de mezcla entre 0,17 °C y 1,07 °C en el embalse Hatillo (tabla 2) es bastante menor al gradiente de 1,5 °C indicado por el mencionado autor. Estas diferencias pueden resultar del hecho que en estos estudios no se incluyeron ecosistemas lénticos insulares, de manera que con la información del embalse Hatillo es posible modificar los límites de estos rangos definidos por Lewis Jr. (1996).

En más del 70% de los 52 muestreos realizados a lo largo de los diez años de estudio en el embalse Hatillo, las masas de agua del embalse han permanecido estratificadas térmicamente, cuyos gradientes térmicos en época de estratificación desde 1,2 °C hasta 5,32 °C (tabla 2), son mayores a la diferencia de 1 a 4 °C que Alcocer et al. (2000) indican que fue suficiente para establecer una termoclina funcional en el lago Alchichica en México, pues como lo indican Lewis Jr. (1996, 2000) y Branco et al. (2009) diferencias relativamente bajas de 2 °C entre la superficie y el fondo, a estas elevadas temperaturas en los lagos tropicales pueden generar suficiente diferencia de densidad como para sostener una estratificación estacional.

Hacia finales o inicios de cada año y por un período inferior a tres meses, se presentaron condiciones de

mezcla en el embalse Hatillo, cuyas diferencias de temperatura entre la superficie y el fondo fueron cercanas o menores a 1 °C, de manera que los gradientes térmicos fueron inferiores 0,06 °C por metro, se obtuvo una RTR total menor a 40, lo que significa como máximo 2,0 unidades por cada metro (figura 4).

Considerando la altitud y ubicación geográfica del embalse Hatillo, se esperaría que este embalse fuera oligomíctico, según lo planteado por Hutchinson y Löffler (1956), es decir con estratificación permanente y solo eventuales procesos de mezcla que pueden presentarse con frecuencia más allá de la anual, sin embargo, bajo la revisión de la clasificación hecha por Lewis Jr. (1983a) esta categoría desapareció.

Talling (1969), Richerson (1991), Lewis Jr. (1996; 2000) y Branco et al. (2009) indican que los lagos tropicales con moderada a gran profundidad, como sería el caso del embalse Hatillo, son predominantemente monomícticos cálidos, mostrando gran regularidad en la mezcla estacional, que típicamente coincide con el invierno del hemisferio correspondiente, así como ha sido observado en Venezuela en el lago Valencia (Lewis Jr., 1984), en Ecuador en el lago San Pablo (Gunkel & Casallas, 2000), en Brasil en los embalses Tucurí (Tundisi et al., 1993), Lajes (Branco et al., 2009) y Barra Bonita (Tundisi et al., 2010), en México en el lago Zirahuén (Tavera & Martínez-Almeida, 2005), la presa Picachos (Beltrán-Álvarez et al., 2012) y el lago Alchichica (Salas de León et al., 2015) así como en Australia en el embalse Tingalpa (Wang et al., 2019).

La estratificación térmica del embalse Hatillo durante la mayor parte del año se presenta debido a los aportes de energía calórica como resultado de la intensidad de radiación solar y baja evaporación, de manera que la mayoría de esta energía se almacena en las capas superficiales. Ya que este almacenamiento de calor es más rápido que su mezcla en profundidad por eventos atmosféricos como el viento o las precipitaciones, entonces se forma una capa epilimnética de menor densidad y mayor temperatura (Richerson, 1991). Durante la noche, en ausencia de radiación solar, se espera transferencia hacia la atmósfera de esta energía calórica ganada en el día por las masas de agua superficiales, que en el caso de los lagos polimícticos puede ser suficiente como

para permitir la mezcla de la columna de agua (Lewis Jr., 1983a; 1996; 2000; Richerson, 1991). En el caso del embalse Hatillo este enfriamiento de las masas de agua superficiales no es suficiente como para incrementar su densidad y favorecer la mezcla, de manera que aún en las primeras horas de la mañana los gradientes térmicos se mantienen y se intensifican a lo largo del día.

Las condiciones de estratificación son ratificadas con los perfiles clinógrafos de oxígeno, que al mantenerse aisladas las capas de agua del fondo de las superficiales durante suficiente tiempo, tanto durante el día como en la noche, hacen que por debajo del límite de la zona fótica, en donde se presentan condiciones de respiración, el oxígeno disuelto se consume, mientras que en la superficie, debido a la producción fitoplanctónica y reaireación atmosférica se mantienen condiciones cercanas a la saturación (Beltrán-Álvarez et al., 2012; Lewis Jr., 2000). Pese a mantener condiciones de estratificación térmica la mayor parte del año, el oxígeno disuelto no se agota en su totalidad en el hipolimnion, posiblemente como resultado de la carga de oxígeno aportada por el río Yuna, que podría estar ingresando a las masas de agua profundas del embalse en razón a su menor temperatura que las aguas superficiales (Margalef, 1983; Richerson, 1991; Roldán & Ramírez, 2008; Tundisi et al., 1993), como ha sido observado en la presa Picachos en México (Beltrán-Álvarez et al., 2012), en los embalses Jurimirim y Chavantes en Brasil (Gomes-Nogueira & Pomari, 2018), en el embalse La Fe en Colombia (Gómez-Giraldo et al., 2013) o en el embalse Tingalpa en Australia (Wang et al., 2019). Sin embargo, este aspecto podría ser evaluado en el embalse Hatillo cuando se cuente con información ambiental simultánea del embalse y del río Yuna.

Si bien a lo largo de todo el año las masas de agua del embalse se mantienen con pH básico o cercano a la neutralidad, las condiciones reductivas en las capas profundas en las que predominan los procesos de respiración y descomposición de la materia orgánica hacen que éstas sean más ácidas que las capas superficiales oxigenadas (Elci, 2008; Lewis Jr., 2000; dos Anjos Neves et al., 2016) encontrando para esta variable perfiles semejantes a los de oxígeno la mayor parte del año en condiciones de estratificación térmica.

Teniendo en cuenta que el embalse Hatillo se localiza

en una isla ubicada en la franja tropical, definida entre los 20° de latitud norte y 20° de latitud sur por Roldán y Ramírez (2008) se espera entonces que en esta condición insular su comportamiento térmico esté definido por la gran masa de agua que rodea la isla, de manera que la estabilidad térmica del mar de las Antillas favorecería la estabilidad térmica de las masas de agua del embalse Hatillo a lo largo del año (Chowdhury et al., 2014).

La mezcla de las masas de agua en el embalse Hatillo hacia enero y febrero está asociada principalmente con varios elementos climáticos, que permiten la disipación de la energía calórica del agua almacenada en el período de estratificación precedente, dado que de noviembre a enero es cuando se registra la menor cantidad de horas de sol al día con promedios de 7,5 a 7,9 horas mientras que de marzo a octubre están entre 8,2 y 9,0 horas diarias (Climate-Data, 2023), lo que implica menor radiación solar, así como las menores temperaturas atmosféricas (figura 3). Estas menores temperaturas atmosféricas en esta época del año se deben al avance de las masas de aire frío que descienden desde el hemisferio norte en su estación invernal que inicia en diciembre (Lewis Jr., 2000), cuya reducción de temperatura atmosférica permite el enfriamiento de las masas de agua superficiales en el embalse, provocando el incremento en su densidad y por lo tanto su hundimiento hasta una profundidad con temperatura y densidad similares.

Este hundimiento, a su vez implica el desplazamiento o movimiento hacia arriba de las capas de agua inferiores, así como la transferencia de calor de las masas de agua cálidas hacia las más frías, cuyos cambios de densidad permiten mayores movimientos verticales de las masas de agua, fenómeno descrito en física como movimientos de advección o advectivos, lo que podría resultar finalmente en la mezcla total de las masas de agua (Imboden & Wüest, 1995).

Con el incremento en la densidad de las masas de agua superficiales, debido a su pérdida de temperatura, se inicia el hundimiento de estas capas de agua superficiales ricas en oxígeno disuelto que se transfiere poco a poco a las capas de agua más profundas a medida que se genera la recirculación de las masas de agua, encontrando durante estos períodos de mezcla las menores diferencias en la concentración de oxígeno disuelto

entre la superficie y el fondo. Así mismo, la mezcla se confirma con las mínimas diferencias en los valores de pH a través de la columna de agua.

Aunque no se cuenta con la información de los caudales de entrada del río Yuna al embalse de manera simultánea con los registros verticales del programa de monitoreo, entre enero y abril es cuando se presentan los menores caudales del río Yuna (Bautista de los Santos, 2014), así como las menores precipitaciones (Climate-Data, 2023), de manera que se presume que la pluma del río Yuna o eventos atmosféricos locales tendrían poca influencia sobre la estructura térmica del embalse en esta época de mezcla, sin embargo es un aspecto que podría ser evaluado cuando se cuente con la información correspondiente.

Es necesario considerar la situación excepcional de enero del 2017, período en el que la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo fue de 1,4 °C, con una RTR total de 44, es decir 2,1 por cada metro. Para este mes en el que se esperaban condiciones de mezcla, se identificó la presencia de la termoclina ente los 4 y 9 m de profundidad con respectivas temperaturas de 25,46 °C y 24,5 °C. Tal como lo indica, Lewis Jr. (1996), las grandes diferencias de densidad a altas temperaturas generan alta estabilidad, de manera que, con diferencias térmicas tan bajas cerca de los 25°C, entre estas profundidades se alcanzó una RTR de 37.

Para este período, desde diciembre de 2016, se presentó una intensa sequía en República Dominicana que se sumó a temperaturas ambientales inusualmente altas en enero de 2017, cuya temperatura máxima y mínima promedio en el Aeropuerto de Cibao, fue de 28,4 °C y 19,2 °C, mientras que el rango del promedio máximo de temperatura de enero del 2010 al 2021 fue de 28 °C a 28,2 °C y el mínimo de 18,9 °C a 19 °C (World Meteorological Organization [WMO], 2022), eventos atribuidos al Fenómeno del Niño de ese año (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2021), de manera que no se presentó la regular reducción de temperatura ambiente que permite los procesos de mezcla anual en el embalse.

En la situación contraria se pudo observar el período entre noviembre de 2020 y abril de 2021, cuando la condición de mezcla alcanzó a mantenerse por

lo menos cuatro meses seguidos. En noviembre de 2020, se experimentó intensa actividad ciclónica en el Océano Atlántico, con la formación de varias tormentas tropicales y huracanes que afectaron a la República Dominicana, provocando fuertes lluvias en enero y febrero de 2021 así como temperaturas inusualmente bajas, llegando a menos de 0 °C en algunas partes del país (NOOA, 2021).

La condición estratificada del embalse Hatillo observada en enero de 2017, se considera una condición atípica con presencia de una sola vez durante los diez años de registros, pues durante los otros nueve años de registros en este período del año se ha presentado mezcla en toda la columna de agua. En tal sentido, el embalse Hatillo es un cuerpo de agua estratificado que presenta un solo período de mezcla al final o inicio de cada año, de manera que se define como un lago monomíctico cálido según la revisión que hizo Lewis Jr. (1983a) a la clasificación de Hutchinson y Löffler (1956), cuyos períodos de mezcla están definidos por diferencias de temperatura entre la superficie y el fondo menores a 1 °C, gradientes térmicos inferiores 0,06 °C por metro, valores de RTR entre capas adyacentes de un metro menores a 20 y RTR total menor a 40, es decir menos de 1,8 unidades por cada metro.

La condición de lago monomíctico cálido del embalse Hatillo, corresponde con la distribución de los ocho tipos de lagos según su patrón de mezcla, considerando la relación entre la latitud y la profundidad media que hizo Lewis Jr. (1983a), así como la relación entre la latitud y profundidad relativa y la relación entre el área y la profundidad media que presenta (Lewis Jr., 2000).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Pueblo Viejo Dominicana Jersey 2 Limited, por compartir su base de datos con los perfiles verticales del embalse Hatillo. De manera especial agradecemos al señor Ramón Ortíz, por la disponibilidad de su lancha y todo su apoyo logístico durante las faenas de campo que realizamos entre los años 2016 y 2021.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

William López participó en la recopilación y análisis de la información, manejo numérico, elaboración de figuras, redacción y elaboración

del manuscrito. Jorge Cuartas en la recopilación y análisis de la información, manejo numérico, elaboración de figuras, redacción y elaboración del manuscrito. Todos los autores aprobaron la versión final del manuscrito.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no presentan conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

- Alcocer, J., Lugo, A., Escobar, E., Sánchez, M. R., & Vilaclara, G. (2000). Water column stratification and its implications in the tropical monomictic Lake Alchichica, Puebla, México. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 27(5), 3166-3169. <https://doi.org/10.1080/03680770.1998.11898262>
- Basak, S., & Sarkar, S. (2006). Dynamics of stratified shear layer with horizontal shear. *Journal of Fluid Mechanics*, 568, 19-54. <https://doi.org/10.1017/S0022112006001686>
- Bautista de los Santos, Q. M. (2014). Determinación de caudales ambientales en la cuenca del río Yuna, República Dominicana. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(3), 33-40. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n3/v5n3a2.pdf>
- Beltrán-Álvarez, R., Ramírez-Lozano, J. P., & Sánchez-Palacios, J. (2012). Comportamiento de la temperatura y el oxígeno disuelto en la presa Picachos, Sinaloa, México. *Hidrobiológica*, 22(1), 94-97. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57824412012>
- Bostrom, B., Andersen, J. M., Flesher, S., & Jansson, M. (1988). Exchange of phosphorus across the sediment-water interface. *Hidrobiología*, 179, 229-144. <https://doi.org/10.1007/BF00024907>
- Branco, C. W. C., Kozłowski-Susuky, B., Sousa-Filho, I. F., Guarino, A. W. S., & Rocha, R. J. (2009). Impact of climate on the vertical water column structure of Lajes Reservoir (Brazil): A tropical reservoir case. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 14(3), 175-191. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2009.00403.x>
- Chang, L., Shiyan, W., Liang, W., Xiaobo, L., Huaidong, Z., Budong, L., & Yanliang, D. (2021). Characteristics and driving factors of thermal stratification evolution in Daheiting Reservoir. *E3S Web of Conferences*, 261, 1-7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126104010>
- Chowdhury, S. A., Hasan, K., & Alam, K. (2014). The use of an aeration system to prevent thermal stratification of water bodies: Pond, lake and water supply reservoir. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 2(1), 1-7. DOI:10.12691/aees-2-1-1

- Climate-Data. (2023, 15 de mayo). *Tabla Climática. Datos históricos del tiempo Santo Domingo*. <https://es.climate-data.org/america-del-norte/republica-dominicana/distrito-nacional/santo-domingo-3882/#climate-table>
- Cole, G. (1988). *Manual de limnología*. Hemisferio Sur.
- Christianson, K. R., Johnson, B. M., & Hooten, M. B. (2020). Compound effects of water clarity, inflow, wind and climate warming on mountain lake thermal regimes. *Aquatic Sciences*, 82(6), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00027-019-0676-6>
- Elci, S. (2008). Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. *Limnology*, 9, 135-142. <https://doi.org/10.1007/s10201-008-0240-x>
- Gómez-Achecar, M. (1997). *Embalses y medio ambiente, Santo Domingo, República Dominicana*. Publicaciones de Ingeniería Civil No. 9. Serie de Geotecnia y Recursos Hidráulicos No. 3. EPSA- LABCO.
- Gomes-Nogueira, M., & Pomari, J. (2018). *Limnological Patterns in a Large Subtropical Reservoir Cascade*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.80632
- Gómez-Giraldo, A., Román-Botero, R., & Toro, M. (2013). Seasonal evolution of the thermal structure of a tropical reservoir. *16th Workshop on Physical Processes in Natural Waters, Queensland, Australia*. <https://www.researchgate.net/publication/316442218>
- Gunkel, G., & Casallas, J. (2000). Limnology of an equatorial high mountain lake — Lago San Pablo, Ecuador: The significance of deep diurnal mixing for lake productivity. *Limnologica*, 32(1), 33-43. [https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(02\)80015-9](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(02)80015-9)
- Guzmán, V., Rosa, F., & Franco, M. (2013). *Memoria institucional. Enero-Diciembre 2013, Santo Domingo, República Dominicana, Empresa de Generación de Hidroeléctrica Dominicana-EGEHID*.
- Harris, G. P. (1999). Comparison of the biogeochemistry of lakes and estuaries: ecosystem processes, functional groups, hysteresis effects and interaction between macro- and microbiology. *Journal of Marine Fresh Waters Research*, 50(8), 791-811. <https://doi.org/10.1071/MF99111>
- Hutchinson, G. E., & Löffler, H. (1956). The thermal classification of lakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 42(2), 84-86. <https://doi.org/10.1073/pnas.42.2.84>
- Imboden, D., & Wüest, A. (1995). Mixing Mechanisms in Lakes. En A. Lerman, D. M. Imboden & J. R. Gat. (Eds.), *Physics and Chemistry of Lakes* (pp. 83-138). Springer Link.
- Kortmann, R. (2003). Relative Thermal Resistance to Mixing. En H. H. Harper & S. H. Sarling. (Eds.), *Proceedings of the 12th Annual North American Lake Management Society Southeastern Lakes Management*.
- Lewis Jr., W. M. (1973). The thermal regime of Lake Lanao (Philippines) and its theoretical implications for tropical lakes. *Limnology and Oceanography*, 18(2), 200-217. <https://doi.org/10.4319/lo.1973.18.2.0200>
- Lewis Jr., W. M. (1983a). A Revised Classification of Lakes Based on Mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(10), 1779-1787. <https://doi.org/10.1139/f83-207>
- Lewis Jr., W. M. (1983b). Temperature, heat, and mixing in Lake Valencia, Venezuela. *Limnology and Oceanography*, 28(2), 273-286. <https://doi.org/10.4319/lo.1983.28.2.0273>
- Lewis Jr., W. M. (1984). A five-year record of temperature, mixing, and stability for a tropical lake (Lake Valencia, Venezuela). *Archiv für Hydrobiologie*, 99(3), 340-346.
- Lewis Jr., W. M. (1996). Tropical lakes: how latitude makes a difference. En F. Schiemer & K. T. Boland. (Eds.), *Perspectives in Tropical Limnology* (pp. 43-64). Academic Publishing.
- Lewis Jr., W. M. (2000). Basis for the protection and management of tropical lakes. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 5(1), 35-48. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00091.x>
- Löffler, H. (1964). The limnology of tropical high-mountain lakes. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 15(1), 176-193. <https://doi.org/10.1080/03680770.1962.11895519>
- Löffler, H. (1968). Tropical high-mountain lakes, their distribution, ecology and zoogeographical importance. *Proceedings of the UNESCO Mexico Symposium 1966, Collection of Geography*, 9, 57-76.
- Margalef, R. (1983). *Limnología*. Ediciones Omega.
- Melack, J. M. (1979). Temporal Variability of Phytoplankton in Tropical Lakes. *Oecologia*, 44, 1-7. <https://doi.org/10.1007/BF00346388>
- Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo. (2018). *Contexto actual del agua en la República Dominicana* [Folleto]. <https://mepyd.gob.do/wp-content/uploads/drive/Publicaciones/Contexto%20actual%20del%20agua%20en%20la%20Republica%20Dominicana.pdf>
- dos Anjos Neves, M., Cruz-Fonseca, L., Calumby-Barreto-Macedo, L., & do Patrocínio Hora-Alves, J. (2016). Estratificação da coluna d'água do reservatório do rio Poxim, São Cristóvão – Sergipe. *XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. <https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=562>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021, 15 de diciembre). *Administración Nacional Oceánica y Atmosférica*. <https://www.noaa.gov/>.
- Oficina Nacional de Planificación y Desarrollo Educativo. (2000). *Informe nacional de la República Dominicana sobre la implementación de lucha contra la desertificación y la sequía*. Oficina Nacional de Planeación Santo Domingo.

- RESCAN. (2004). *Pueblo Viejo Project: Aquatic Baseline Report. Appendices*. Pueblo Viejo Dominicana Corporation by Rescan Environmental Services Ltd., Vancouver, British Columbia.
- RESCAN. (2005). *Pueblo Viejo Project: Estudio de Impacto Ambiental*. Rescan TM Environmental Services Ltd., Vancouver, British Columbia.
- RESCAN. (2008). *Expansión de Procesamiento del Proyecto Sulfuros Pueblo Viejo. Reporte de Evaluación*. Rescan Environmental Services Ltd., Vancouver, British Columbia.
- Richerson, P. (1991). El régimen de estratificación termal. En C. Dejoux & A. Iltis. (Eds.), *El Lago Titicaca, síntesis del conocimiento limnológico actual* (pp. 139-148). HISBOL.
- Roldán, G., & Ramírez, J. J. (Ed.). (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. (2nd ed.). Editorial Universidad de Antioquia.
- Salas de León, D. A., Alcocer, J., Aediles-Gloria, V., & Quiroz-Martínez, B. (2015). Coeficiente de difusión térmica en un lago monomíctico cálido tropical. En J. Alcocer, M. Merino-Ibarra & E. Escobar-Briones. (Eds.), *Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica* (pp. 33-38). Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología.
- Salas, H., & Martino, P. (2001). *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales*. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS 1981-1990. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55330?locale-attribute=es>
- Talling, J. F. (1969). The incidence of vertical mixing, and some biological and chemical consequences, in tropical African lakes. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 17(2), 998-1012. <https://doi.org/10.1080/03680770.1968.11895946>
- Tavera, R., & Martínez-Almeida, V. (2005). Atelomixis as a possible driving force in the phytoplankton composition of Zirahuen, a warm-monomictic tropical lake. *Hydrobiologia*, 553, 199-208. <https://doi.org/10.1007/s10750-004-2418-5>
- Tundisi, J. G., Matsumura-Tundisi, T., & Calijuri, M. C. (1993). Limnology and management of reservoirs in Brazil. En M. Straškraba, J. G. Tundisi, & A. Duncan. (Eds.), *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management, vol 77*. (pp. 25-56). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-1096-1_2
- Tundisi, J. G., Matsumura-Tundisi, T., Pereira, K. C., Luzia, A. P., Passerini, M. D., Chiba, W. A. C., Morais, M. A., & Sebastien, N. Y. (2010). Cold fronts and reservoir limnology: an integrated approach towards the ecological dynamics of freshwater ecosystems. *Brazilian Journal of Biology*, 70(3), 815-824. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842010000400012>
- Wang, X., Zhang, H., Bertone, E., Stewart, R. A., & O'Halloran, K. (2019). Analysis of the mixing processes in a shallow subtropical reservoir and their effects on dissolved organic matter. *Water*, 11(4), 737. <https://doi.org/10.3390/w11040737>
- Wetzel, R. G. (1981). *Limnología*. Ediciones Omega.
- World Meteorological Organization. (2022, 15 de enero). *Wheater Climate - Water*. <https://public.wmo.int/en>