

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

VALPARAÍSO-CHILE



**ESTIMACIÓN DE SEDIMENTACIÓN EN EL
EMBALSE “EL YESO” MEDIANTE EL USO DE
IMÁGENES SATELITALES**

Memoria de Título presentada por

Felipe Ampuero Aravena

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Raul Flores Audibert

Septiembre de 2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

TÍTULO DE LA TESIS:

Estimación de sedimentación en el embalse “El Yeso” mediante el uso de imágenes satelitales.

AUTOR:

Felipe Ampuero Aravena

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Raúl Flores Audibert

.....

Valparaíso, Chile, Septiembre de 2022

ESTIMACIÓN DE SEDIMENTACIÓN EN EL EMBALSE “EL YESO” MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES SATELITALES

Felipe Ampuero Aravena ¹, Raul Flores Audibert ¹,

1 Universidad Técnica Federico Santa María

ÍNDICE

1	RESUMEN	5
2	INTRODUCCIÓN	5
3	LUGAR DE ESTUDIO	6
3.1	Embalse El Yeso	6
3.2	Climatología Embalse “El Yeso”	8
4	MATERIALES	9
4.1	Imágenes Satelitales	9
4.2	Información Hidrológica	11
5	METODOLOGÍA	14
5.1	Obtención del Área del embalse “El Yeso” mediante el uso de imágenes satelitales	14
5.2	Generación de modelos de elevación (DEM) anuales.	16
5.2.1	Extracción de la “Waterline”	16
5.2.2	Asignación de nivel de agua de la “Waterline”	17
5.2.3	Filtrado de los archivos anuales de “waterlines”	18
5.2.4	Interpolación de la superficie del embalse	18
5.3	Estimación de la Sedimentación en el embalse.	19
5.3.1	Estimación de transporte de sedimento mediante curvas de Fleming adaptadas a cuencas montañosas chilenas 21	
6	RESULTADOS	22
6.1	Delimitación de la masa de agua del embalse	22
6.2	Generación DEM del embalse “El Yeso”.	26
6.3	Estimación de sedimentación	29
7	DISCUSIÓN	30
7.1	Interpretación de resultados	30
7.2	Limitaciones de la investigación	33
8	CONCLUSIONES	34
9	REFERENCIAS	36
10	ANEXOS	39

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1 - UBICACIÓN EMBALSE “EL YESO” EN; A) IMAGEN GENERAL DEL EMBALSE, B) EN LA SUB-SUBCUENCA “YESO” (EN COLOR VERDE SE PRESENTA EL EMBALSE), C) EN LA REGIÓN METROPOLITANA (EN COLOR VERDE SE PRESENTA EL EMBALSE)	7
FIGURA N° 2 - AFLUENTES DEL EMBALSE "EL YESO".	8
FIGURA N° 3 – PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA ESTACIÓN EMBALSE "EL YESO".	9
FIGURA N° 4 - SERIE DE TIEMPO DEL NIVEL EN EL EMBALSE "EL YESO".	12
FIGURA N° 5 - CAUDAL DE INGRESO AL EMBALSE "EL YESO".	13
FIGURA N° 6 – PRECIPITACIÓN PROMEDIO MENSUAL “ESTACIÓN EL YESO”, PERIODO 2000-2020.	14
FIGURA N° 7 - PROCESO DE DELIMITACIÓN DE MASAS DE AGUA, A) IMAGEN SATELITAL ORIGINAL DEL EMBALSE; B) IMAGEN SATELITAL TRANSFORMADA AL ÍNDICE NDWI; C) MASA DE AGUA DELIMITADA DE LA IMAGEN SATELITAL UTILIZANDO EL MÉTODO OTSU; D) WATERLINE OBTENIDA DE LA MASA DE AGUA DEL EMBALSE EL YESO.	17
FIGURA N° 8 – PROCESO DE INTERPOLACIÓN KRIGING , A) CUERPO COMPLETO; B) ÁREA DE INTERÉS.	19
FIGURA N° 9 - ILUSTRACIÓN SECTOR ELEGIDO PARA ANÁLISIS DE SEDIMENTACIÓN.	20
FIGURA N° 10 - ILUSTRACIÓN SECTOR ANÁLISIS (COLOR CAFÉ).	20
FIGURA N° 11 - IMÁGENES PROCESADAS POR MÉTODO UTILIZADO.	23
FIGURA N° 12 - SERIE DE TIEMPO EMBALSE "EL YESO" PARA MÉTODOS KITTLER-NIR Y OTSU-NDWI	24
FIGURA N° 13 - ERROR ÁREA REAL V/S ÁREA EXPERIMENTAL MÉTODO OTSU-NDWI Y KITTLER-NIR.	26
FIGURA N° 14 - MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (DEM) PARA EL EMBALSE "EL YESO" DURANTE EL PERIODO 2000-2020.	29
FIGURA N° 15 - ALTURA PROMEDIO PARA MODELOS DE ELEVACIÓN (DEM) DEL EMBALSE "EL YESO" PARA EL PERIODO 2000-2020. DIECINUEVE DEMS ANUALES FUERON USADOS PARA REALIZAR UN AJUSTE LINEAL.	30
FIGURA N° 16 - ESTACIONES UTILIZADAS AJUSTE ZONA CENTRO.	41
FIGURA N° 17 - ESTACIONES UTILIZADAS AJUSTE ZONA CENTRO.	41
FIGURA N° 18 - ESTACIONES UTILIZADAS AJUSTE ZONA CENTRO.	42

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 2 - LONGITUD DE ONDA Y RESOLUCIÓN DE LAS 11 BANDAS QUE COMPONEN LAS IMÁGENES SATELITALES PROVENIENTES DEL SATÉLITE LANDSAT 8.	10
TABLA N° 3 - VALORES DE CALIBRACIÓN PARA CAUCES EN EL CENTRO DE CHILE.	21
TABLA N° 4 - NÚMERO DE IMÁGENES PROCESADAS POR MÉTODO EMPLEADO.	22
TABLA N° 5 - ESTACIONES UTILIZADAS PARA AJUSTE DE PARÁMETROS, ZONA CENTRO.	39

1 RESUMEN

Los embalses son obras ampliamente utilizadas en Chile para el almacenamiento de agua, sin embargo, los estudios de los factores que puedan afectar su funcionamiento han sido prácticamente nulos. Por esta razón, la siguiente investigación se enfocará en realizar el análisis de la existencia de sedimentación en uno de los embalses más característicos del país, el embalse “El Yeso”, ubicado en la cuenca alta del río Maipo, en la región Metropolitana.

Para poder obtener la sedimentación existente en el embalse se utilizarán, primero, imágenes satelitales del sector, las que fueron conseguida de los satélites Landsat 4 y Landsat 8. La elección de estos se justifica en que entregan un periodo de información satelital más amplio que otros de sus semejantes, tales como el Sentinel (Nath et al., 2010). Para este caso, el estudio abarcará el análisis de imágenes tomadas durante un lapso que comprende los años 2000-2020.

Una vez tenido estos datos, se procederá, en segundo lugar, a delimitar el sector de interés para este trabajo, el que corresponde a la masa de agua del embalse. Para lograr separar este última de la masa de suelo existente en las imágenes, serán utilizados los métodos Thresholding o de valor límite, específicamente aquellos que, según la literatura, presentan mejores resultados (Sezgin and Sankur, 2004), como son el método Otsu (Otsu, 1979) y Kittler (Kittler and Illingworth, 1986).

Una vez realizado lo anterior se obtendrá, como resultado, el dato de la “waterline” (límite entre masa de agua y masa de suelo), a la que se le asignará la altura del nivel del embalse medido para su respectiva fecha. Posteriormente, todas las “waterlines” de un mismo año serán agrupadas para realizar una interpolación del tipo Kriging (método de interpolación geoestadístico que incluye la autocorrelación entre los puntos), lo que llevará a conseguir el DEM del embalse para cada año de la serie de tiempo estudiada. Finalmente, al realizar una regresión lineal entre los valores promedio de un sector en específico (el que corresponde a la parte del embalse donde se produce la sedimentación en mayor medida) de los DEM generados, se llegará a la conclusión de que el lecho del embalse “El Yeso” ha visto reducido su elevación promedio con una tasa de 66.15 cm/año.

2 INTRODUCCIÓN

Los embalses son obras ampliamente utilizadas para el almacenamiento y regulación de agua en Chile, destinadas a asegurar el abastecimiento del recurso hídrico. No obstante, a pesar de la gran relevancia que estas estructuras tienen para el país, el estudio de los factores que pueden llegar a influenciar su capacidad, y por ende la variabilidad temporal de agua que puede ser efectivamente almacenada, ha sido mínimo. Esto último no es óptimo, toda vez que el actual escenario de crisis hídrica en el territorio nacional (Garreaud et al., 2020) hace relevante que se realicen los correspondientes estudios y análisis del funcionamiento de estas obras de almacenamiento. Teniendo en consideración esta afirmación, la siguiente investigación se hará cargo de uno de aquellos factores que pueden llegar a influenciar la capacidad de los embalses, como es la acumulación de sedimentos, especialmente en aquellos que regulan ríos en zonas montañosas donde el arrastre de material puede llegar a ser significativo (Iroume, 2003).

Comúnmente el método más aplicado, para la medición y estudio de masas de agua (específicamente la batimetría), corresponde al uso de ecosonda (De Moustier, 1988; Gomez, 2013). Este consiste en la emisión de una onda sonora, la que se refleja en el fondo marino, y en base al tiempo que demora el recorrido de dicha onda, se le es asociada una profundidad equivalente. A pesar de ser este un método de gran precisión, se encuentra sujeto tanto a las condiciones climáticas del momento en que es realizado como también, y de forma fundamental, a la posibilidad de acceder con el equipo al sector en estudio.

Por esta razón, el uso de imágenes satelitales de alta resolución es una herramienta que ofrece una alternativa para el muestreo, gracias a la amplia cobertura espacio-temporal que presentan y el fácil acceso a la información. Este método vuelve más sencillo el estudio de diversos aspectos tales como áreas, volúmenes y sedimentación, en grandes masas de agua como son ríos, lagos y embalses (Zhang et al., 2015), especialmente en sectores montañosos donde el acceso es un factor relevante. Datos satelitales se han utilizado para el estudio de embalses en diversas partes del mundo; por ejemplo, la Agencia Catalana del Agua, en el año 2018, generó un proyecto para el estudio y análisis de la gestión de los sedimentos en embalses (Retema,2018), y así en otros lugares del mundo (ej. Berdugo,2016; Soydan,2020; Jeleve,2020).

En Chile, las investigaciones sobre el funcionamiento de embalses han sido bastante reducidas y principalmente atribuidas a temas de gestión (ej. Figueroa and Alejandro, 2003). Específicamente, ha habido poco estudio sobre el componente de sedimentación, debido a la poca información existente respecto al transporte de sedimentos en las cuencas chilenas. Esto último se refleja, por ejemplo, en la poca continuidad de los muestreos, ya que para un mismo punto de estudio no existen mediciones en ciertas estaciones del año. Otro aspecto en que queda patente esta situación es en la poca cantidad de cuencas que poseen estaciones sedimentológicas (que se encargan de realizar muestreos sedimentológicos): de las 143 cuencas existentes, tan solo 29 cuentan con este tipo de herramienta. Para el caso objeto de esta investigación, la estación del embalse “El Yeso” se encuentra suspendida, por lo que no existe información de sedimentación in situ.

En este trabajo se utilizarán imágenes de los satélites Landsat 4 y 8, en el periodo de estudio comprendido entre los años 2000-2020, para estimar una tasa media de sedimentación en el embalse El Yeso. Esta estructura se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Maipo, y tiene por finalidad abastecer de agua potable a la región Metropolitana. Para lograr el objetivo, se seguirá la metodología propuesta por Zhang et al. (2015), utilizando métodos de “thresholding” (o valor límite) para la delimitación de masas de agua (ej. Sezgin and Sankur,2004; Otsu, 1979; Kittler and Illingworth, 1986). Posteriormente se generarán modelos de elevación de la batimetría del embalse, a partir de interpolar la información anual del nivel de agua en el embalse medida. La interpolación que será utilizada corresponde a la del tipo Kriging, a fin de estimar la tasa de sedimentación durante el lapso de análisis ya definido. El resultado que se obtendrá dará muestra de que la elevación promedio del lecho del embalse ha disminuido durante el periodo investigado. Esta memoria se enmarca en el proyecto FONDEF ID19I10359 “Sistema integrado de monitoreo y modelo hidrológico-químico para la gestión de recursos hídricos aplicable a la prevención de desastres naturales y adaptación al cambio climático”.

3 LUGAR DE ESTUDIO

3.1 Embalse El Yeso

El embalse “El Yeso” (33°39’N-70°04’S) fue inaugurado en el año 1964 y se encuentra a una altitud de 3000 metros sobre el nivel del mar, en la parte alta de los Andes en Chile central. Posee una capacidad de 253 Mm³, siendo su principal afluente el río Yeso. Esta obra se encuentra en el lugar denominado Boca del Valle, situado a 23 km aguas arriba de la junta del río Yeso con el río Maipo, a 73 km de Santiago. La ubicación del embalse se muestra en la Figura N° 1.

La Unidad Hidrográfica donde se encuentra el embalse “El Yeso” corresponde a la Cuenca Río Maipo Alto, específicamente en la sub-subcuenca llamada río Yeso, esta última posee un área aproximada de 627 km².

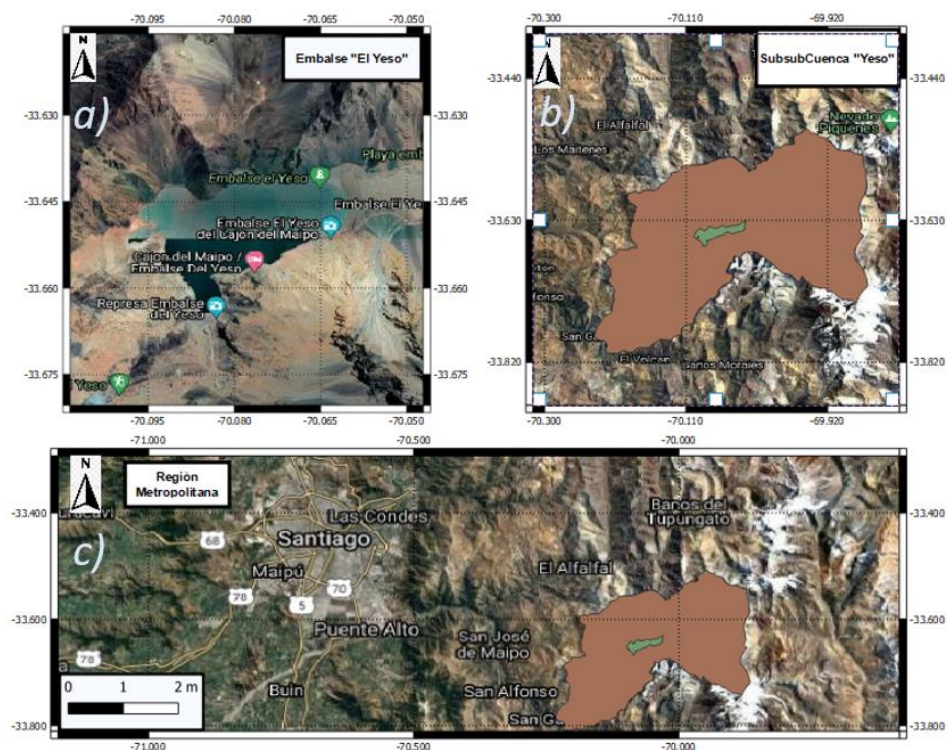


Figura N° 1 - Ubicación Embalse “El Yeso” en; a) imagen general del embalse, b) en la Sub-Subcuenca “Yeso” (en color verde se presenta el embalse), c) en la región metropolitana (en color verde se presenta el embalse)

Fuente: Elaboración Propia

El principal curso de agua que abastece al embalse es el río Yeso, que se origina a partir de la ablación de glaciares ubicados en su cabecera, siendo los más importantes los glaciares Bello, Yeso, del Pirámide y Marmolejo. Asimismo, los principales afluentes del río son los esteros de las Yeguas Muertas, del Plomo, Salinillas, del Aparejo-Morado y de la Casa de Piedra. En la actualidad, y tal como ya se señaló, el embalse en cuestión no posee estación sedimentológica vigente. En la Figura N° 2 se presentan las principales fuentes de abastecimiento del embalse.

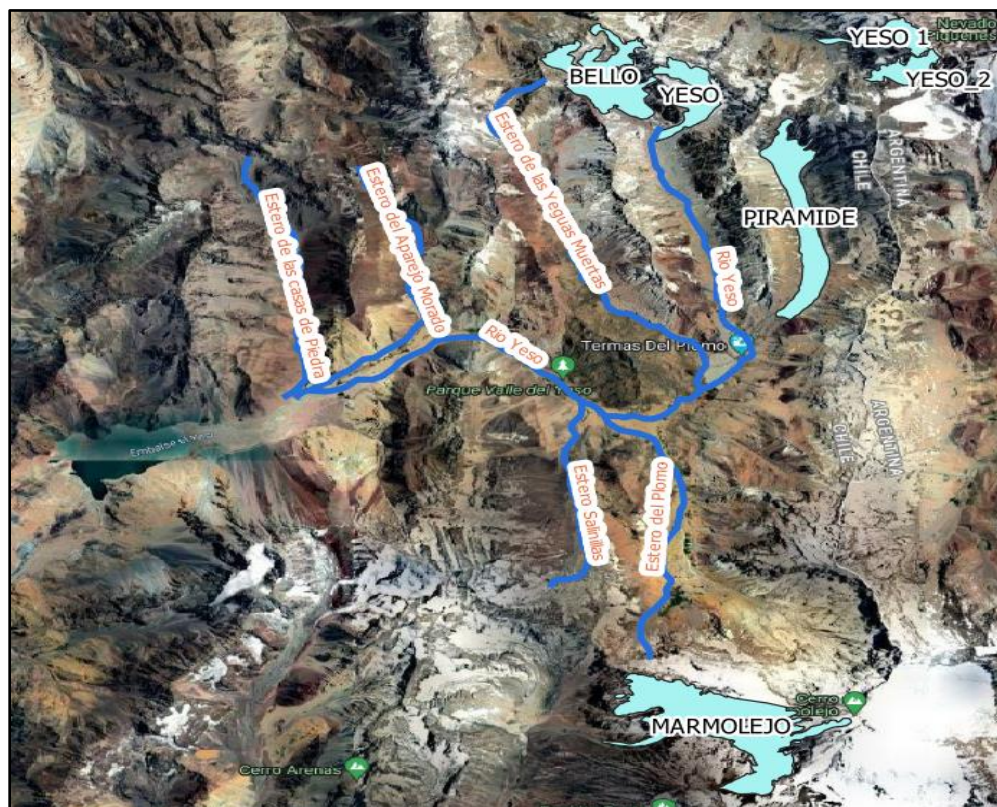


Figura N° 2 - Afluentes del Embalse "El Yeso".

Fuente: Elaboración Propia.

3.2 Climatología Embalse “El Yeso”

El área donde se encuentra el embalse presenta sus mayores valores de temperatura (Figura N° 3) entre los meses de diciembre-abril (periodo de verano principalmente), llegando a ser superiores a los 15°; por contraparte, el periodo de las temperaturas más bajas ocurre entre los meses de junio-septiembre (estación de invierno), donde llegan a registrarse valores cercanos a los 0°C.

Con respecto a las precipitaciones (Figura N° 3), se puede observar que el tiempo donde más abundan es entre los meses de julio-septiembre (estación de invierno), donde se supera ampliamente el valor de los 100 mm de precipitaciones, pudiendo incluso verse registros donde se superan los 350 mm. Sin embargo, en los últimos tiempos estas cifras máximas han ido disminuyendo significativamente, lo que se atribuye al periodo de sequía y cambio climático por el que Chile se encuentra inmerso desde el año 2010 aproximadamente.

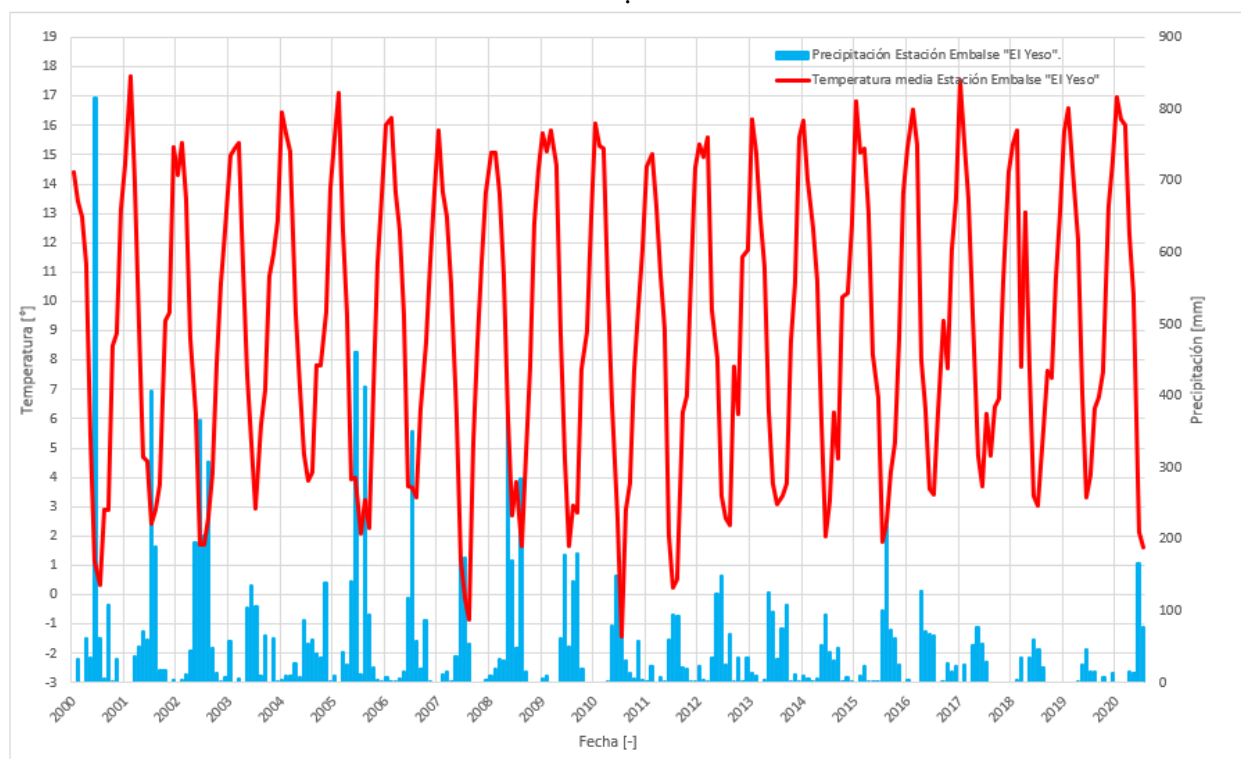


Figura N° 3 – Precipitación y Temperatura Estación Embalse "El Yeso".

Fuente: Elaboración Propia.

Otro aspecto relevante del embalse corresponde al espejo de agua, ya que este actúa como regulador térmico de la isoterma 0°C, notándose recién a partir de los 3.000 m de altura las precipitaciones son principalmente de carácter sólido.

Finalmente, la gran importancia del embalse “El Yeso” radica en ser la principal fuente de agua potable para la región Metropolitana, presentando sus mayores niveles de almacenamiento entre el periodo octubre-febrero, producto del marcado régimen nival presente en la subcuenca alta del Maipo.

4 MATERIALES

4.1 Imágenes Satelitales

Un total de 153 imágenes satelitales, con una resolución espacial de 30m, fueron obtenidas para poder mapear la masa de agua existente a lo largo del tiempo de estudio en el embalse. Los satélites de donde se obtuvieron las imágenes son los siguientes: Landsat 4-5TM (30 metros de resolución espacial) y Landsat 8 Enhanced Thematic Mapper (30 metros de resolución espacial), utilizándose el explorador de la agencia USGS (United States Geological Survey) EarthExplorer (www.earthexplorer.usgs.gov) para la obtención de la información de cada uno de los satélites utilizados. Asimismo, todas las visualizaciones fueron seleccionadas, de tal manera, que se encontraran libres de nubes, para que se lograra observar claramente el límite agua-suelo.

Tanto el satélite Landsat 4-5T y Landsat 8 forman parte de la constelación Landsat, la que está conformada por 9 de estos objetos, los que llevan a bordo diferentes instrumentos y de los cuales sólo se encuentran activos el 5, 8 y 9. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con cada vez mayor nivel de precisión y detalle. De ahí que se pueden observar las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos de estos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), y el segundo como Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros.

Las imágenes satelitales son la representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial, a modo de ejemplo: la serie de satélites Landsat, según el sensor, pueden estar compuestas de 4 (Landsat-1,2,3) hasta 11 bandas espectrales (Landsat-8, **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Dependiendo del satélite y sensor, son incluidos un canal pancromático en el rango visible, bandas infrarrojas, y bandas térmicas. Las resoluciones espaciales varían entre 15, 30, 60 y 120 según el sensor y banda, originalmente estas últimas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación, aplicaciones geológicas y el estudio de los recursos naturales. Estas bandas también pueden combinarse entre sí, produciendo una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Una de estas son los casos de delimitación de masas de agua, en que su uso es bastante amplio, toda vez que la elección de alguna banda espectral o una combinación entre estas, se basa en cual se adapta mejor a las condiciones específicas (Rokni et al.,2014) del sector en estudio (superficie, existencia de vegetación, existencia de nieve, etc); sin embargo, las bandas espectrales más utilizadas en esta clase de análisis corresponden a la NIR-SWIR (Ryu et al.,2002), por su gran precisión en la obtención de la “waterline” (límite entre la masa de agua y la masa de suelo en una imagen satelital).

Tabla N° 1 - Longitud de onda y resolución de las 11 bandas que componen las imágenes satelitales provenientes del satélite Landsat 8.

Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1-Aerosol	0,435-0,451	30
Banda 2-Blue	0,452-0,512	30
Banda 3-Green	0,533-0,590	30
Banda 4-Red	0,636-0,673	30
Banda 5-Near Infrared (NIR)	0,851-0,879	30
Banda 6-Short wave infrared (SWIR) 1	1,566-1,651	30
Banda 7-Short wave infrared (SWIR) 2	2,107-2,294	30
Banda 8-Panchromatic	0,503-0,676	15
Banda 9-Cirrus	1,363-1,384	30
Banda 10- Thermal Infrared (TIRS) 1	10,600-11,190	100
Banda 11- Thermal Infrared (TIRS) 2	11,500-12,510	100

Luego de la obtención de las imágenes se procede a realizar en estas una corrección radiométrica, que es una de las vías para enmendar las imperfecciones presentes en los píxeles (perdidas de filas y columnas de píxeles, valores de celdas se encuentran asignados de manera errónea en algún pixel, otra imperfección que podría existir tiene relación a la presencia de gases en la atmosfera o variaciones estacionales que generan que los valores de reflectividad de los píxeles se vean ligeramente alterados influyendo en los colores de la imagen resultante). Esta consiste en convertir la información de cada píxel de las fuentes originales, pasando de niveles digitales a niveles de reflectancia captadas por el sensor (Gregorio et al.,2002). Entre algunos de los motivos que influyen en estas distorsiones presentes en las imágenes de satélite se encuentran: fallos

propios de los sensores, alteraciones en el movimiento del sensor, fallas en instrumentos a bordo del satélite o la interferencia de la atmósfera.

En este trabajo se realizó una búsqueda manual de las imágenes satelitales donde se trabajó únicamente con imágenes que no presentaran nubes en la zona del embalse, en caso de existir, la imagen satelital se descartaba.

Respecto a la resolución temporal se buscó, como objetivo, utilizar al menos una imagen mensual, en función de la disponibilidad existente en las plataformas de descarga. Es importante destacar que poseer una mayor cantidad de estas representaciones visuales, a nivel mensual, ayuda a mejorar el proceso de interpolación espacial que se realiza para la generación de DEM; no obstante, se debe tener en consideración que, en estos casos, las imágenes deben presentar entre sí una variación significativa en la superficie de agua que abarcan, para volver más eficiente el proceso de interpolación futura.

Para esta investigación en concreto, se utilizan imágenes satelitales donde se logra apreciar el embalse “El Yeso”, lo que implica realizar un proceso de recorte de las visualizaciones originales, toda vez que estas presentan una extensión muy superior a la zona de interés de este estudio. Además, se procede a colocar la fecha en la que fue obtenida cada una de estas imágenes, ya que esto permite, en conjunto con la información proporcionada por la empresa sanitaria, asociar un nivel de agua específico. Cabe recordar que todas las representaciones visuales trabajadas se encuentran dentro del periodo de análisis, es decir, entre los años 2000-2020.

4.2 Información Hidrológica

Niveles diarios de agua fueron proporcionados por la empresa sanitaria encargada del manejo del embalse durante el periodo 2000-2020 (Figura N° 4). Se logra observar que el nivel mínimo del embalse ocurrió en los años 2012 y 2020, llegando a un valor de 15 metros aproximadamente en cada uno; por el contrario, el nivel máximo se alcanzó sostenidamente entre los años 2001-2004, con un valor aproximado de 43 metros.

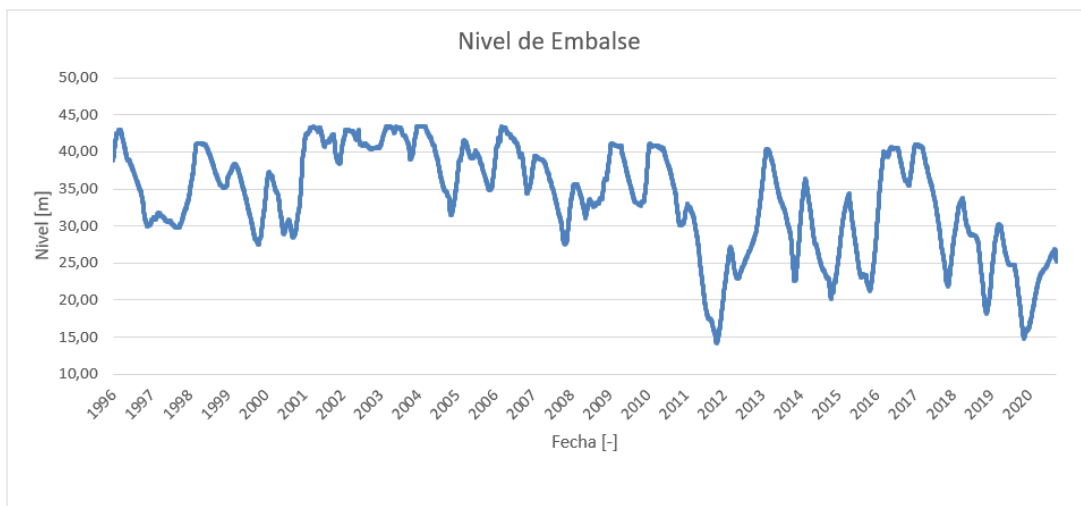
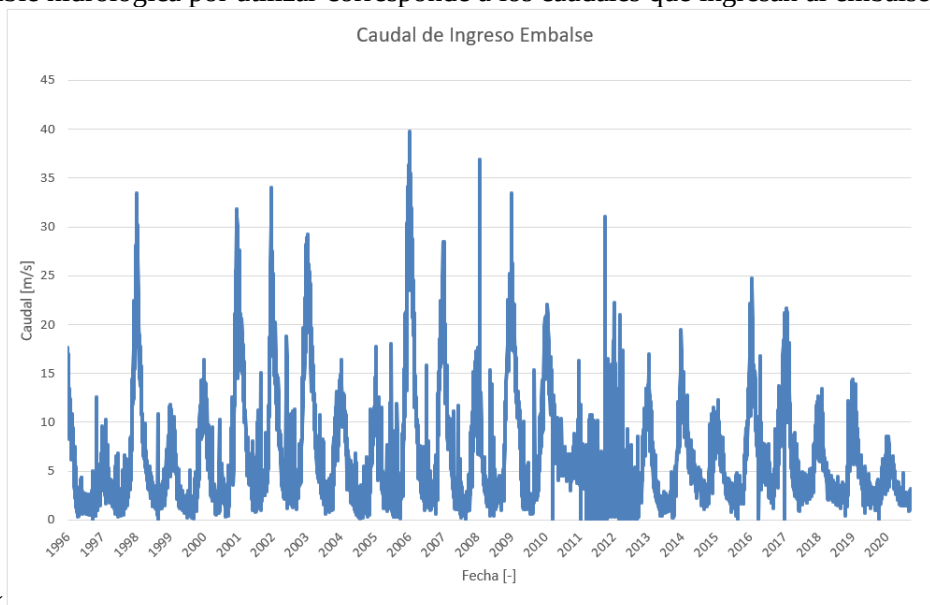


Figura N° 4 - Serie de Tiempo del nivel en el embalse "El Yeso".

Fuente: Elaboración Propia.

Otra variable hidrológica por utilizar corresponde a los caudales que ingresan al embalse, provenientes del



río Yeso (

Figura N° 5). Esta información es utilizada en conjunto con fórmulas empíricas (curvas de Fleming), que relacionan el caudal líquido promedio anual y el gasto sólido de un río. Para esta investigación, las curvas de Fleming aplicadas se encuentran ajustadas para las cuencas de Chile Central (Jimenez,2016), ya que de esta manera se permite realizar una primera aproximación teórica de cuánto material sólido transporta el río Yeso y qué sedimenta en el fondo de este.

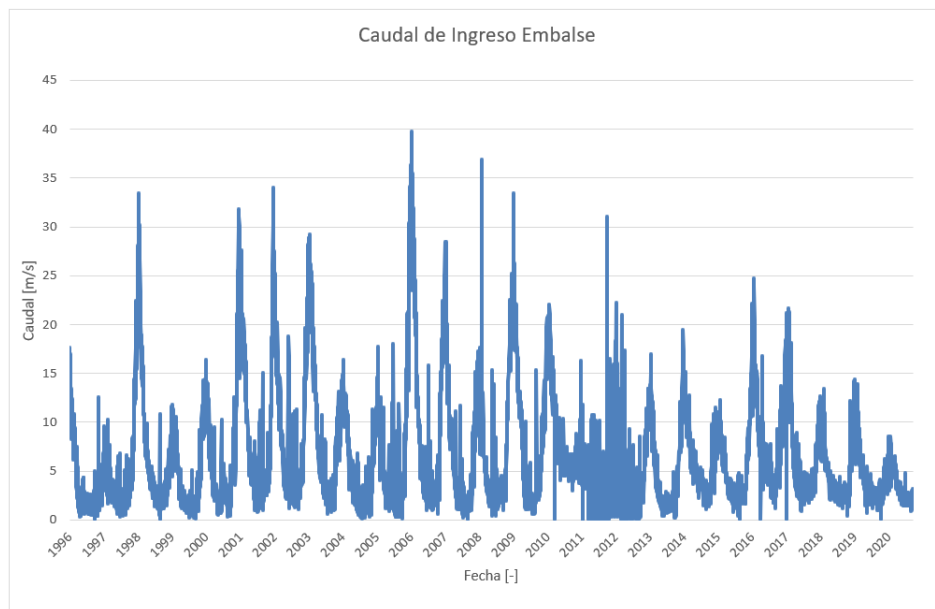


Figura N° 5 - Caudal de Ingreso al Embalse "El Yeso".

Fuente: Elaboración Propia,

Otro aspecto que ayuda a tener una mejor comprensión del comportamiento anual del embalse es el marcado régimen nival existente en la cuenta alta del río Maipo, el que provoca diferencias aproximadas de 15 metros en el muro de descarga, entre los periodos donde este presenta su mayor y menor nivel de agua. El aumento de precipitaciones durante el período de abril-septiembre (en la Figura N° 6 se presentan las precipitaciones promedio de la estación “El Yeso”, lo que permite observar el comportamiento en el sector de estudio), genera que en los meses posteriores aumente el caudal en el río “El Yeso” producto de los deshielos que ocurren en el sector.



Figura N° 6 – Precipitación Promedio Mensual “Estación El Yeso”, periodo 2000-2020.

Fuente: Elaboración Propia.

5 METODOLOGÍA

El proceso para estimar la variación en la elevación promedio que ha experimentado el embalse “El Yeso”, durante el período 2000-2020, está constituido por tres etapas, las cuales se describen a continuación.

5.1 Obtención del Área del embalse “El Yeso” mediante el uso de imágenes satelitales

Para cada imagen satelital analizada se procede a extraer las coordenadas (x,y) de la masa de agua que corresponde al embalse, utilizando los métodos estadísticos de “thresholding” o valor límite de Otsu (Otsu,1979) y Kittler (Kittler and Illingworth,1986). En base a la literatura analizada, estos dos son los que presentan mejores resultados por su sencillez y facilidad de implementación para delimitar masas de agua (Sezgin and Sankur,2004).

La filosofía de trabajo de los métodos de “thresholding” es segmentar las imágenes, creando una partición binaria de las intensidades de las imágenes. Estas técnicas tratan de determinar un valor de intensidad llamado umbral, que separa las clases deseadas. La segmentación se logra agrupando, por un lado, todos los píxeles cuyo valor de intensidad es menor que el umbral y, por otro, aquellos con valores de intensidad mayores que el umbral. Estos métodos se emplean para obtener la segmentación de imágenes cuando hay una clara diferencia en las intensidades entre los objetos a extraer respecto del fondo de la escena. El principio que rige esta diferenciación corresponde a la similitud entre los píxeles pertenecientes a un objeto y sus diferencias respecto al resto. Por esto, la imagen debe caracterizarse por un fondo uniforme (suelo) y por objetos parecidos.

Los métodos de Thresholding tratan de asignar cada píxel a un cierto grupo o segmento. La imagen por segmentar (en este caso imágenes satelitales) está compuesta por valores numéricos correspondientes a cada píxel. La pertenencia de un píxel a cierto segmento se decide mediante la comprobación de su nivel de gris con un cierto valor umbral. El nivel de gris de un píxel equivale a su nivel de intensidad y, en este caso, está directamente relacionada con la reflectividad de las diferentes bandas que presentan las imágenes satelitales.

Al aplicar un umbral, T , la imagen, $f(x,y)$, quedará binarizada; definiendo con “1” los píxeles correspondientes al objeto (masa de agua) y con “0” aquellos que son del fondo (suelo). Por ejemplo, si los objetos son claros respecto del fondo, se aplicará:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow f(x, y) > T \\ 0 & \Leftrightarrow f(x, y) \leq T \end{cases}$$

Cómo se logra observar en la fórmula anteriormente presentada, el principal objetivo de los métodos de thresholding es determinar el valor T, que actúa como umbral.

La principal diferencia entre los métodos estadísticos a utilizar radica en que el método Otsu (1979) busca definir el valor umbral, “T”, que entrega la mayor diferencia entre los promedios de las poblaciones (objeto y fondo). Por otra parte, el método Kittler (1986) se enfoca en encontrar el valor límite que minimiza los pixeles que se encuentran en las dos poblaciones simultáneamente.

Una vez determinado los métodos a utilizar, se vuelve necesario establecer los índices o bandas espectrales que permitan con un alto grado de precisión la delimitación del embalse. En base a la literatura analizada se decide utilizar la banda espectral NIR, es decir, Infrarrojo cercano (Ryu et al.,2002) y los cinco índices espectrales (Rokni et al.,2014) presentados a continuación:

1. Normalized Difference Water Index (NDWI) (Yao et al,2019): Índice diferencial de Agua Normalizado, se utiliza para el análisis de masas de agua. El índice utiliza bandas verdes y casi infrarrojas de imágenes satelitales. Uno de sus defectos es que presenta sensibilidad a la acumulación de tierra resultando en la sobreestimación de los cuerpos de agua. La fórmula para obtener este valor es la siguiente:

$$NDWI = \frac{Banda\ Green - Banda\ Nir}{Banda\ Green + Banda\ Nir}$$

2. Normalized Difference Moisture Index (NDMI) (Acharya et al,2018): Índice de diferencia normalizada de Humedad, se utiliza para determinar el contenido de agua de la vegetación. Se calcula como una relación entre los valores NIR y SWIR.

$$NDMI = \frac{Banda\ Nir - Banda\ Swir}{Banda\ Nir + Banda\ Swir}$$

3. Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) (Zhou et al, 2014): Índice de diferencia de Agua Normalizado Modificado, este índice surgió como respuesta a la incapacidad del índice NDWI para separar elementos cubiertos de agua. Por este motivo en 2006, se propuso modificar el índice NDWI reemplazando la banda del infrarrojo cercano (NIR) por la banda del infrarrojo medio (SWIR). Los valores de este índice varían entre -1 y 1, donde los valores superiores a cero corresponden a cuerpos de agua. La fórmula para obtener este valor es el siguiente:

$$MNDWI = \frac{Banda\ Green - Banda\ Swir}{Banda\ Green + Banda\ Swir}$$

4. Water Ratio Index (WRI) (Gautam et al,2015): Este índice se basa en la existencia de una mayor reflectancia de cuerpos de aguas en las bandas verde y banda roja en comparación con el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio (SWIR). El índice WRI presentan valores, en general, mayores a uno para cuerpos de agua. La fórmula para obtener este valor es el siguiente:

$$WRI = \frac{Banda\ Green + Banda\ Red}{Banda\ Nir + Banda\ Swir}$$

5. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Lu et al,2011): El índice de vegetación de la diferencia normalizada, es un indicador numérico que utiliza las bandas espectrales rojo e infrarrojo cercano. El NDVI está altamente asociado con el contenido de vegetación. La fórmula para obtener este índice es el siguiente:

$$NDVI = \frac{Banda\ Nir - Banda\ Red}{Banda\ Nir + Banda\ Red}$$

De esta manera se trabajarán con las siguientes combinaciones Método Thresholding-Banda espectral:

1. Método Otsu-Índice NDWI.
2. Método Otsu-Índice NDMI.
3. Método Otsu-Índice MNDWI
4. Método Otsu-Índice NDVI
5. Método Otsu-Índice WRI
6. Método Kittler-Banda NIR

Para completar el proceso de extracción del área, se realiza un proceso de filtro manual para todos aquellos píxeles que no fueron eliminados por el método thresholding y que visualmente se logra observar que no corresponden a la masa de agua del embalse, por lo que deben ser removidos.

Todo este proceso es implementado en el lenguaje de programación “R”, siguiendo los siguientes pasos:

1. Se procede a generar los cinco (5) índices espectrales mencionados previamente para cada imagen satelital descargada y almacenada. Para esto, en el lenguaje “R”, son cargadas todas las bandas espectrales que conforman una imagen satelital. De esta forma son luego utilizadas según las fórmulas ya presentadas, generando así los índices espectrales. Se debe mencionar que este proceso se realiza a cada uno de los píxeles existentes en la imagen satelital.
2. Se continúa aplicando los dos (2) métodos thresholding ya descritos: Por un lado, para el método Otsu (1979) se utiliza la librería del mismo nombre, existente en el lenguaje “R” Por otro, para el método Kittler (1986) se genera el script donde se encuentra almacenada su fórmula para delimitar masas de agua. Este proceso se realiza a cada una de las imágenes satelitales almacenadas según las combinaciones mencionadas previamente.
3. Finalmente, en el mismo lenguaje “R”, se procede a visualizar el resultado del método de thresholding, para luego realizar el proceso de filtro manual. Para esto, se obtiene el archivo final discretizado por píxeles, prosiguiendo con la eliminación manual de aquellos píxeles que no correspondan a masa de agua.

5.2 Generación de modelos de elevación (DEM) anuales.

5.2.1 Extracción de la “Waterline”

Una vez obtenida la masa de agua existente en todas las imágenes satelitales procesadas, se procede a definir la línea de agua (o “waterline”). Esto se refiere a conseguir el límite que separa la masa de agua obtenida y el suelo del embalse (Figura N° 7), es decir, la frontera entre estas 2 poblaciones. Una vez tenidas en cuenta las “waterlines”, se procede a convertir en un archivo de puntos discretos con sus coordenadas (x,y).

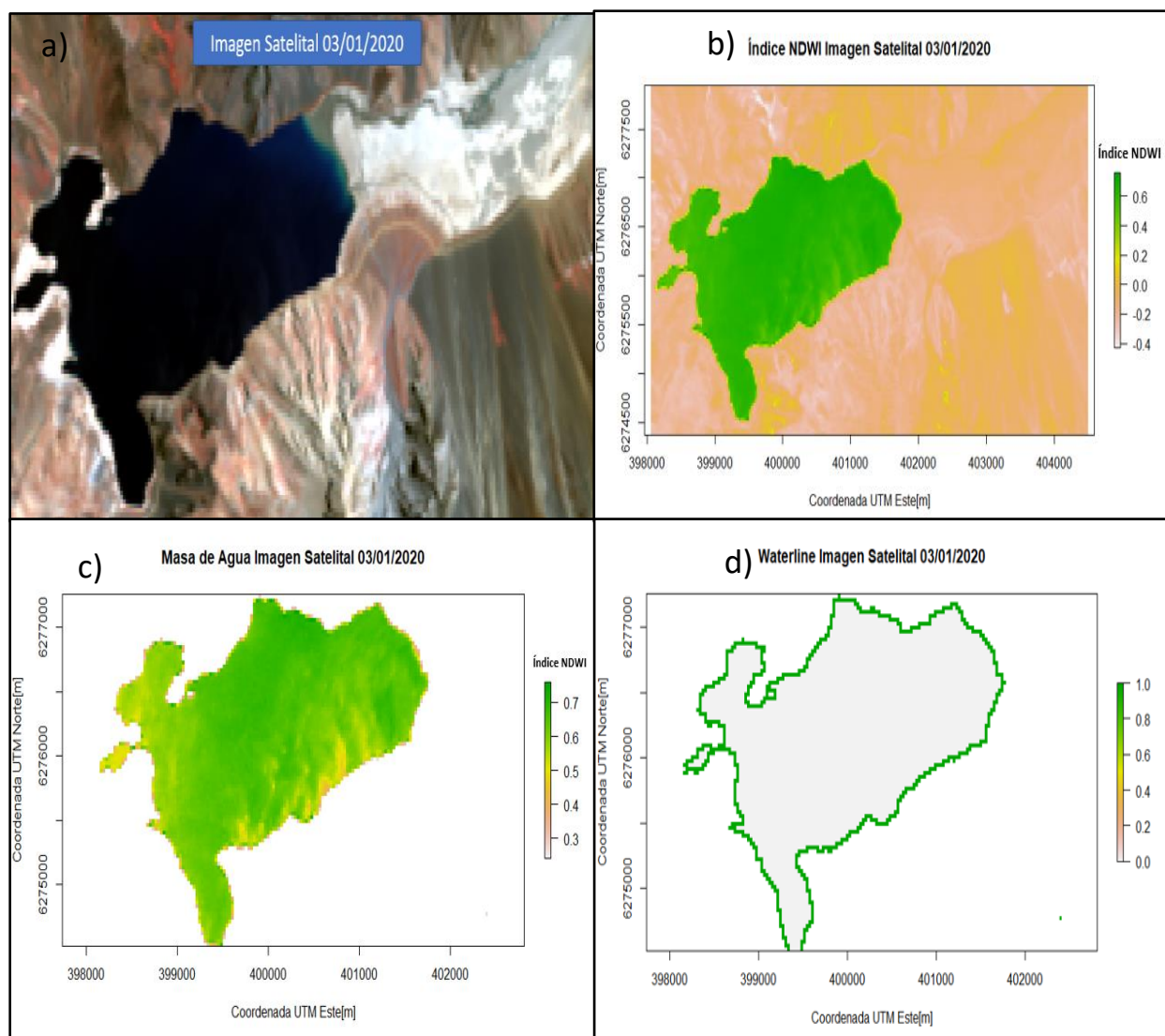


Figura N° 7 - Proceso de Delimitación de Masas de agua, a) Imagen Satelital original del embalse; b) Imagen satelital transformada al Índice NDWI; c) Masa de agua delimitada de la imagen satelital utilizando el método OTSU; d) waterline obtenida de la masa de agua del embalse el yeso.

5.2.2 Asignación de nivel de agua de la “Waterline”

Se utilizarán las fechas en las cuales fueron conseguidas las imágenes satelitales, para de esta manera y en combinación con los niveles de agua en el embalse, asignar la altura a las “waterlines” obtenidas.

Para esta etapa de asignación de niveles a las “waterlines” se utilizó el siguiente supuesto: el nivel de agua a ingresar sería el mismo para todos los puntos discretizados, sin importar la ubicación en que se encuentren estos, este supuesto se basa en aspectos tales como que el embalse no es considerablemente extenso en superficie, por lo cual no existiría una diferencia considerable en su batimetría.

Producto de lo explicado previamente, se posee una imagen satelital por cada mes analizado y por esto se procede a agrupar todas las “waterlines” de un mismo año en un único archivo de puntos discretizados, con sus respectivos niveles de agua.

5.2.3 Filtrado de los archivos anuales de “waterlines”

Producto de la unificación de todos los archivos mensuales a uno anual, puede ocurrir que para una determinada coordenada (x,y) existan más de un nivel de agua asociados, esto puede ocurrir producto de la combinación de 2 factores: primero, la resolución trabajada (30m x30m) puede generar que sectores, que visualmente se observan en lugares diferentes, sean agrupados en el mismo pixel; segundo, por las imágenes satelitales de meses consecutivos, donde la variación del área entre esos meses no es significativa. Por tanto, se procede a realizar un proceso de filtrado, para eliminar esta duplicidad existente en determinados píxeles, este mecanismo consiste en reemplazar el valor del nivel de agua por la mediana asociada a este grupo de datos (Liu et al., 2013).

5.2.4 Interpolación de la superficie del embalse

Inicialmente se procede a generar una grilla siguiendo la metodología del “Rectángulo Delimitador mínimo” (Caldwell D. R. ,2005), esta es una geometría delimitadora formada por las coordenadas (x,y) mínimas y máximas del archivo unificado anual de “waterlines”. Esta grilla generada posee la misma resolución de las imágenes trabajadas, es decir 30 metros.

Posteriormente y producto que las “waterlines” generadas previamente son puntos discretos del embalse, es que se procede a realizar una interpolación para poder generar el archivo DEM completo de la obra. Está interpolación corresponde a la del tipo Kriging (Oliver and Webster,1990), utilizando como input el archivo unificado de “waterlines”.

La interpolación Kriging, corresponde a un método de interpolación geoestadístico, que se encuentra basado en modelos estadísticos que incluyen autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Esta presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. Esta interpolación ajusta una función matemática a una cantidad específica de puntos.

La fórmula en la que se basa la interpolación Kriging se presenta a continuación:

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

Donde:

$Z(s_i)$: Valor medido en la ubicación i

λ_i : ponderación para el valor medido en la ubicación i

s_0 : Ubicación de la predicción

n: cantidad de valores medidos

En el método Kriging, las ponderaciones están basadas no sólo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos. Es por

esto que, en esta interpolación, la ponderación, depende del modelo ajustado a los puntos medidos, la distancia a la ubicación de la predicción y las relaciones espaciales entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción.

Específicamente para esta investigación, producto de la interpolación Kriging se obtendrá un archivo DEM de la variación anual en la batimetría del embalse.

Finalmente, habiendo realizado la interpolación, se procede a delimitar el área que efectivamente corresponde a agua, producto que en la grilla generada se incluyen zonas que no son de relevancia para el estudio. Este proceso se observa en la Figura N° 8, donde a la imagen superior se le resta las superficies de las imágenes con mayor y menor área, obteniendo de esta manera la imagen inferior, que corresponde a la zona valida de la interpolación Kriging.

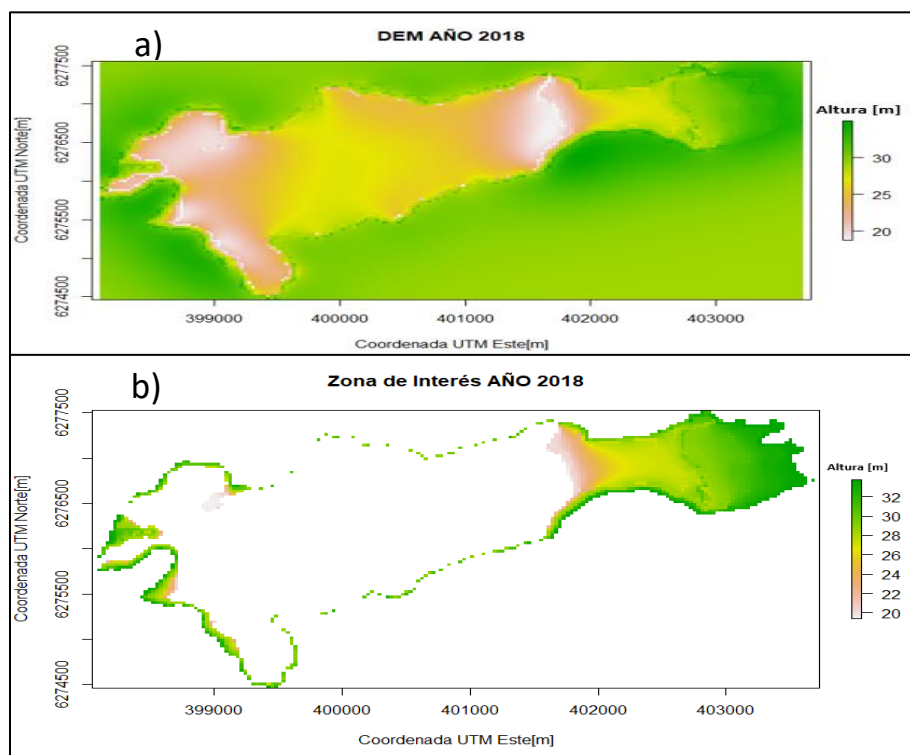


Figura N° 8 – Proceso de interpolación Kriging , a) Cuerpo Completo; b) Área de Interés.

Fuente: Elaboración Propia.

5.3 Estimación de la Sedimentación en el embalse.

Una vez generados los archivos DEM anuales para el embalse se procede a trabajar con una parte en específico (Figura N° 8), que corresponde al sector donde el río Yeso se conecta al embalse. La elección de un sector en específico, y no del total del embalse, se debe a la presunción de que el lugar elegido es el que recibe, de manera más relevante, los sedimentos transportados por el río.

En la Figura N° 9, se presenta de manera grafica el sector elegido (color café) para analizar la sedimentación, en comparación con la superficie del embalse (color azul) para el año 2020. Por otro lado, en la Figura N° 10 se presenta la zona de estudio vista desde una imagen satelital, donde se logra observar que esta corresponde al sector donde el rio Yeso entrega el recurso hídrico.

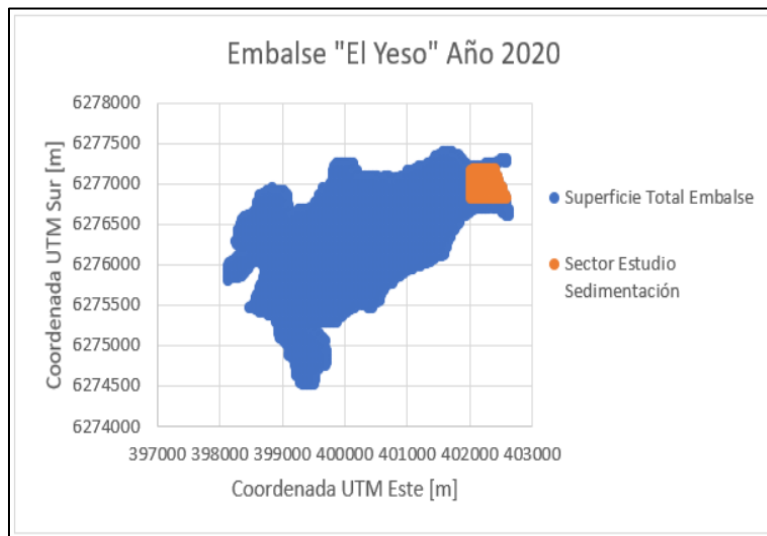


Figura N° 9 - Ilustración Sector elegido para análisis de sedimentación.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 10 - Ilustración Sector Análisis (color café).

Fuente: Elaboración Propia

Una vez seleccionado el sector a analizar (Figura N° 10), para la obtención de la sedimentación experimental se siguen los siguientes pasos, según la metodología de Zhang et al. (2015):

1. Para cada archivo DEM generado se procede a obtener la altura promedio del sector elegido para el análisis de la sedimentación.
2. Se realiza una regresión lineal con todos los valores de altura promedio obtenidos.
3. Generada la regresión, se procede a obtener la tasa sedimentación, por año, ocurrida en el embalse El Yeso.
4. Calculada la tasa de sedimentación por año y en conjunto con el área del embalse, se procede a obtener el volumen de sedimentación por año.

5.3.1 Estimación de transporte de sedimento mediante curvas de Fleming adaptadas a cuencas montañosas chilenas

Para estimar la sedimentación teórica, que debería generarse producto del aporte del río Yeso, se utilizarán las curvas de Fleming (Jimenez,2016). La utilización de una formulación empírica por sobre información in-situ de sedimentación (que sería más precisa y confiable), puesto que no se poseen datos del transporte de sedimentos existentes en del río en cuestión.

En general, los métodos presentados en investigaciones anteriores, realizadas en Chile, utilizan información sedimentológica in-situ (Lecaros,2011), tomando en cuenta también la topografía de los cauces que alimentan a los embalses, pudiendo determinar el caudal sólido de fondo. Para esta investigación se opta por fórmulas empíricas, por cuanto, en la actualidad, se encuentra fuera de uso la estación sedimentológica existente en el embalse El Yeso.

Las curvas de Fleming están basadas en datos de más de 250 cuencas alrededor de todo el mundo. Estas curvas permiten determinar la tasa media anual de transporte de sedimentos (o caudal sólido en suspensión promedio) en función del caudal líquido promedio y parámetros de calibración.

En general, las estaciones utilizadas (Tabla N° 4) para ajustar los parámetros en las curvas de Fleming para el centro de Chile se encuentran en ríos que provienen de cuencas montañosas. Siendo más específico, existen estaciones en la región Metropolitana que se encuentran aguas abajo del embalse “El Yeso”, lo que permite ajustar parámetros que se adaptan de manera más cercana al comportamiento del sector en estudio. Todas las estaciones utilizadas se ilustran en la sección 10

A continuación, se presenta la ecuación parametrizada de Fleming (1969).

$$G_s = a * Q^n$$

Donde:

G_s : Gasto o caudal sólido en suspensión promedio [ton/año]

Q : Caudal líquido promedio o medio anual [m^3/s]

a, n : Parámetros de calibración

Según Jiménez (2016) los parámetros que mejor se ajustan para cauces en el centro de Chile son los siguientes:

Tabla N° 2 - Valores de Calibración para cauces en el centro de Chile.

Parámetro	Valor [-]
a	82,749
n	0.62

Luego, para obtener el volumen de sólidos en suspensión acumulados por unidad de tiempo (V_s) se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_s = \frac{G_s}{\gamma_{ss}}$$

Donde:

G_s : Gasto o caudal sólido en suspensión promedio [ton/año]

V_s : Volumen de sólidos en suspensión [m^3]

γ_{ss} : Peso específico del material sólido en suspensión ($\approx 1.3 [T/m^3]$)

5.3.2 Sedimentación obtenida a partir del uso de imágenes satelitales

Para obtener el volumen de sedimentos en el embalse es que se procede a utilizar la siguiente ecuación.

$$V_s = A * h$$

Donde:

V_s : Volumen de sólidos en suspensión [m^3]

A: Área del sector en estudio [m^2]

h: Altura de sedimentos en el embalse [m]

6 RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentarán en tres secciones, de acuerdo con el orden seguido en la sección metodología presentada anteriormente, es decir:

- Delimitación de la masa de agua del embalse.
- Generación de DEM
- Estimación de la sedimentación en el embalse.

6.1 Delimitación de la masa de agua del embalse

Para realizar el proceso de delimitación de la superficie del embalse “El Yeso”, se utilizó el lenguaje de programación “R”. A partir de esto se logró observar que las combinaciones de los métodos Otsu-Índice espectral NDWI y Kittler-Banda espectral “NIR” (infrarrojo cercano) fueron las únicas que presentaron resultados satisfactorios (se delimita el embalse de manera clara), por lo que se optó por desechar el restante de combinaciones presentadas previamente. A continuación, en la Tabla 6-1, se presentan el número de imágenes procesadas en el sector del embalse para estas dos combinaciones seleccionadas.

Tabla N° 3 - Número de imágenes procesadas por método empleado.

Fuente: Elaboración Propia.

N° Total Imágenes Procesadas	
N°Imágenes OTSU-NDWI	155
N°Imágenes Kittler-NIR	147

Por otro lado, en la Figura N° 11 se presentan el número de imágenes procesadas, las cuales son discretizadas por año.

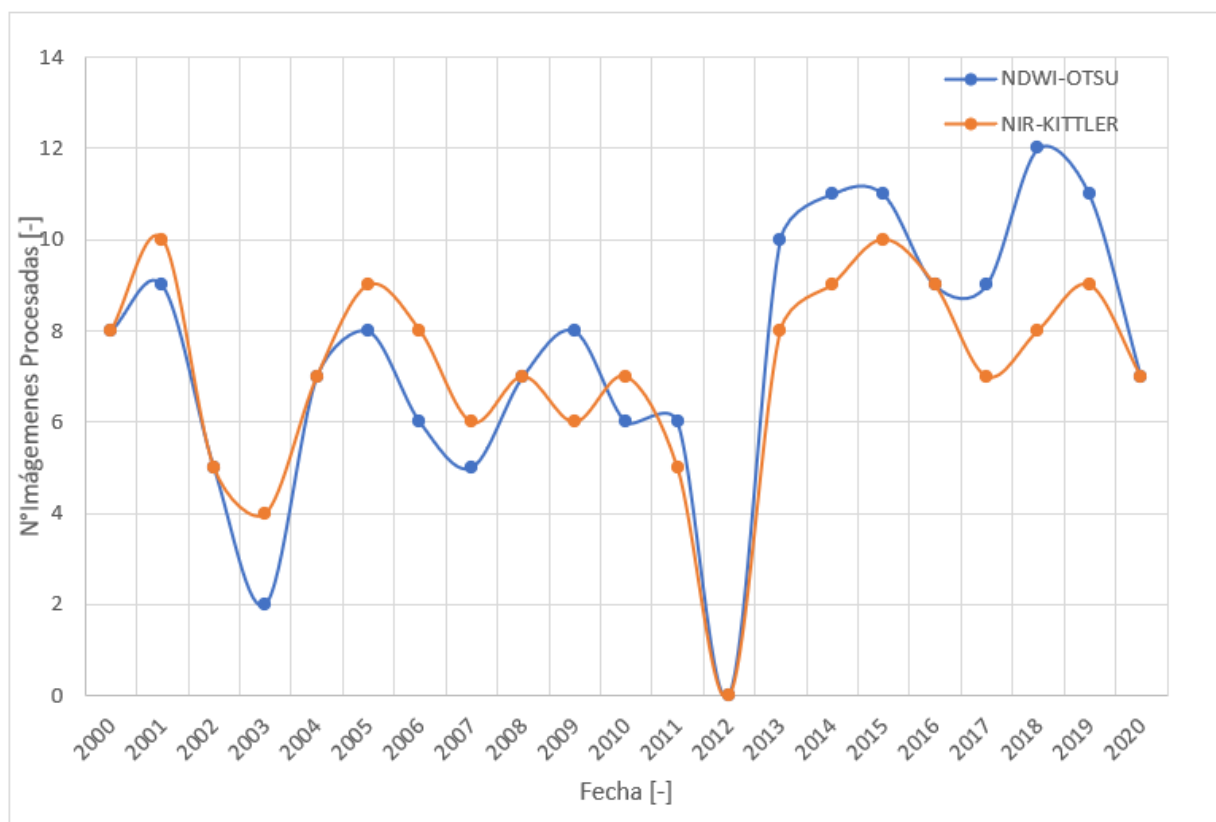


Figura N° 11 - Imágenes Procesadas por método utilizado.

Fuente: Elaboración Propia.

Cómo se logra observar, a partir del año 2013, la cantidad de imágenes procesadas aumenta considerablemente, esto se explica en el cambio correspondiente al satélite Landsat 8 Enhanced Thematic Mapper, lo que permitió una mayor cantidad de imágenes disponibles para procesar. No obstante, debido que este cambio en el satélite ocurre durante el 2012, no existen imágenes satelitales que puedan ser procesadas en este año, lo que explica su ausencia en los gráficos presentados.

Posteriormente, una vez obtenida la masa de agua del embalse, se procede a obtener su respectiva área, de esta manera se logra generar la serie de tiempo para el periodo 2000-2020, la cual es presentada en la Figura N° 12, en esta son presentadas de manera conjunta las 2 combinaciones trabajadas, como ya se mencionó previamente de las 6 combinaciones iniciales, se determinó que solo 2 entregaban resultados óptimos por lo cual se decidió eliminar el resto de combinaciones.

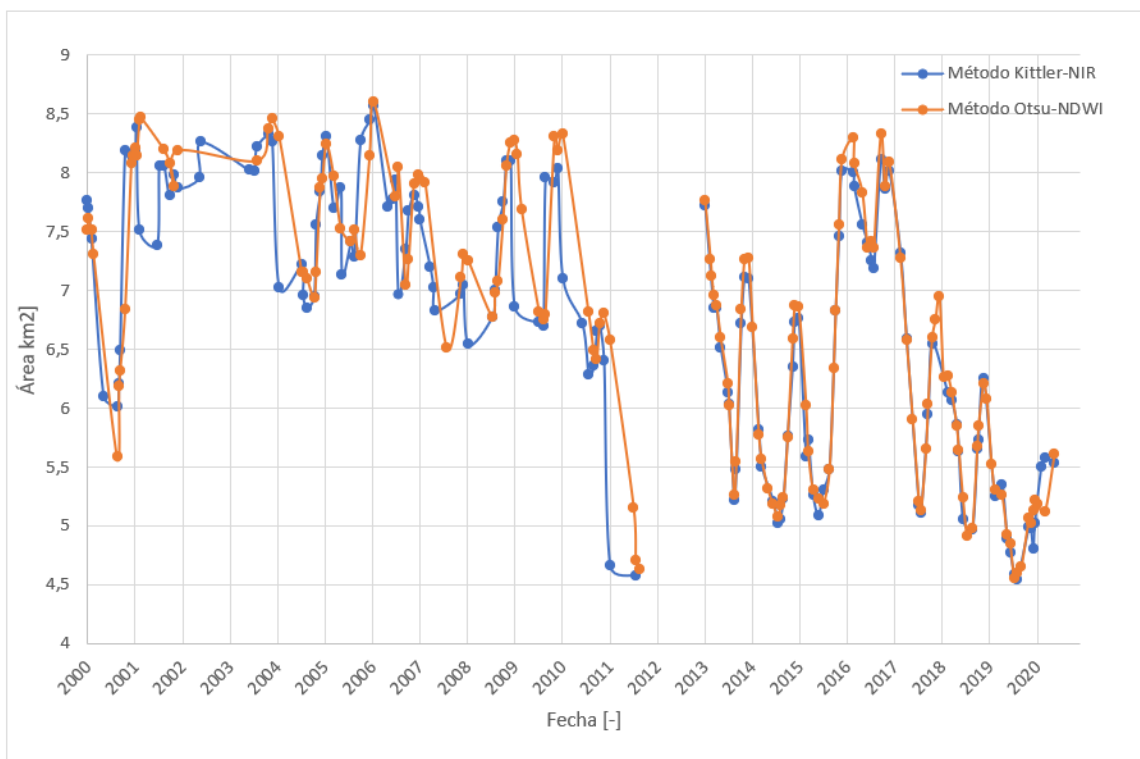


Figura N° 12 - Serie de Tiempo Embalse "El Yeso" para métodos Kittler-Nir y Otsu-NDWI

Fuente: Elaboración Propia.

Cómo se logra observar en las series de tiempo, a partir del periodo del 2010, existe una tendencia a la disminución en el área del embalse. Antes de este año se logra observar un área constante en el tiempo, sin la existencia de una clara tendencia, siendo las únicas variaciones existentes aquellas que se pueden enmarcar en los periodos de hielo-deshielo, que afectan directamente su capacidad.

Al momento de analizar otras variables que afectan directamente al embalse, como son precipitación, temperatura y caudales, vemos en general una clara tendencia a la disminución. En primer lugar, al observar la Figura N° 3, se observa claramente una tendencia negativa en las precipitaciones a partir del año 2012-2013, lo que se encuentra directamente relacionado al cambio climático que ha afectado a la zona centro del país por más de 10 años. Sin embargo, al analizar la serie de tiempo para la temperatura en la estación meteorológica existente en el embalse, se logra observar que este sector pasa por ciclos bien marcados, donde las temperaturas mínimas aumentan o disminuyen a lo largo de toda la serie presentada y no una tendencia negativa significativa en los últimos 10 años de mediciones.

Teniendo en consideración lo mencionado anteriormente y en congruencia con la baja en las precipitaciones en el último periodo de tiempo, la serie de caudal (

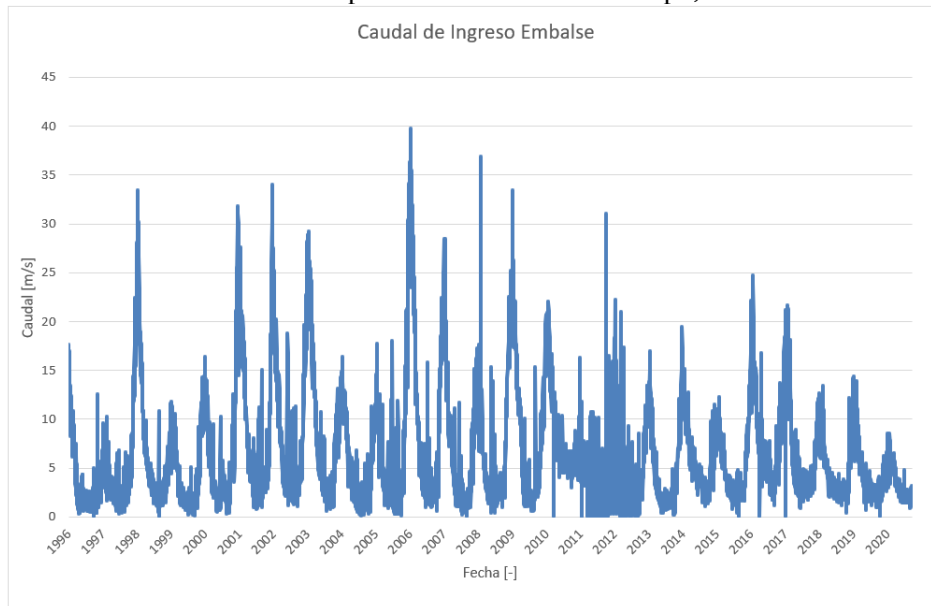


Figura N° 5) que provienen del río El Yeso también presenta una reducción a partir del año 2013, atribuible a una baja en el proceso de deshielo (producto de menores precipitaciones). No obstante, se logra observar en la Figura N° 4 que el nivel del embalse no sufre variaciones que sean asociadas directamente a esta disminución en el caudal que ingresa hasta el año 2017. Ya posterior a esta fecha se puede afirmar que la reducción de las precipitaciones sí afecta el nivel de este.

Para verificar la veracidad de los resultados obtenidos, es que se procede a comparar el valor de área obtenido y el valor real del área del embalse (estos valores son proporcionados al igual que los niveles diarios de agua por la empresa sanitaria encargada). Esta comparación se realiza mediante la obtención del error porcentual (Figura N° 13) para cada una de las imágenes procesadas.

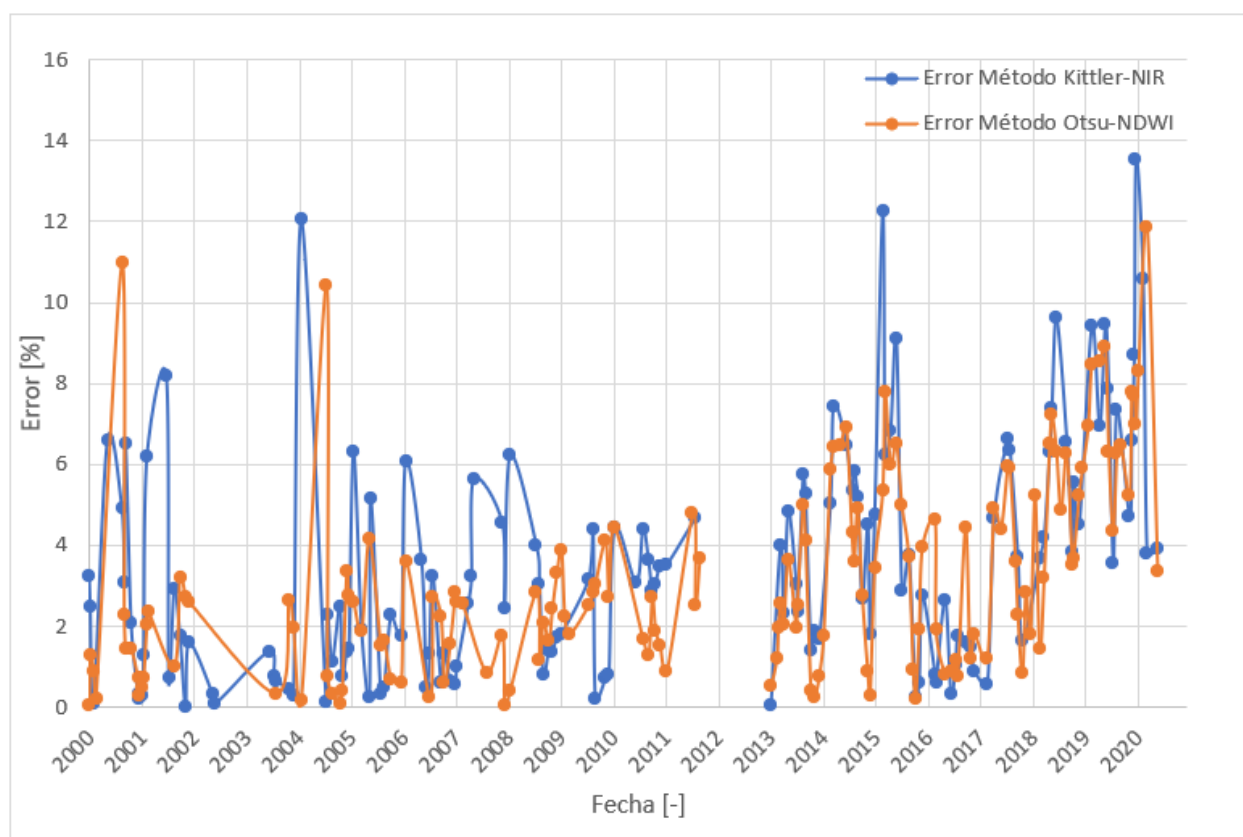


Figura N° 13 - Error Área Real v/s Área experimental método Otsu-NDWI y Kittler-NIR.

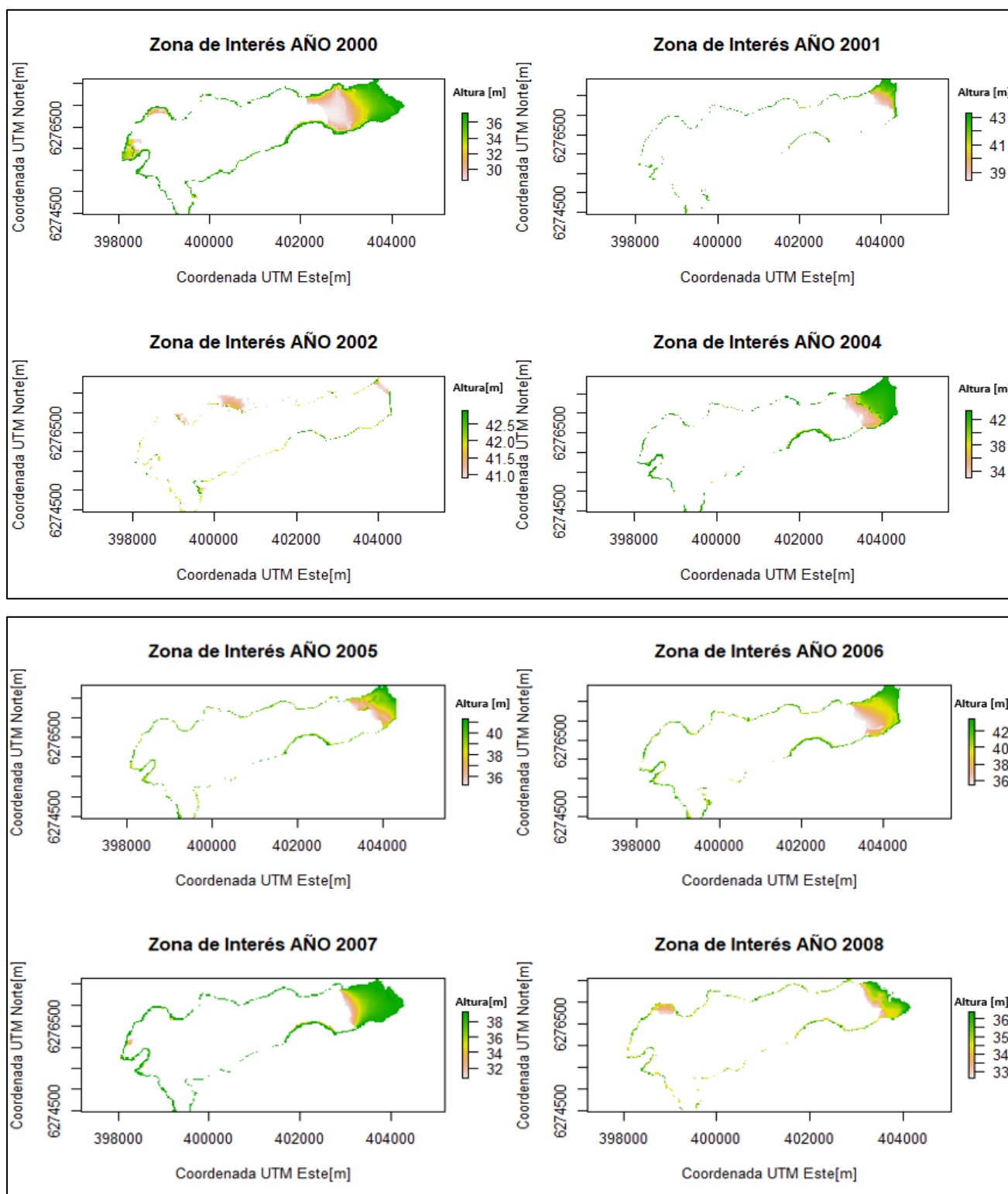
Fuente: Elaboración Propia.

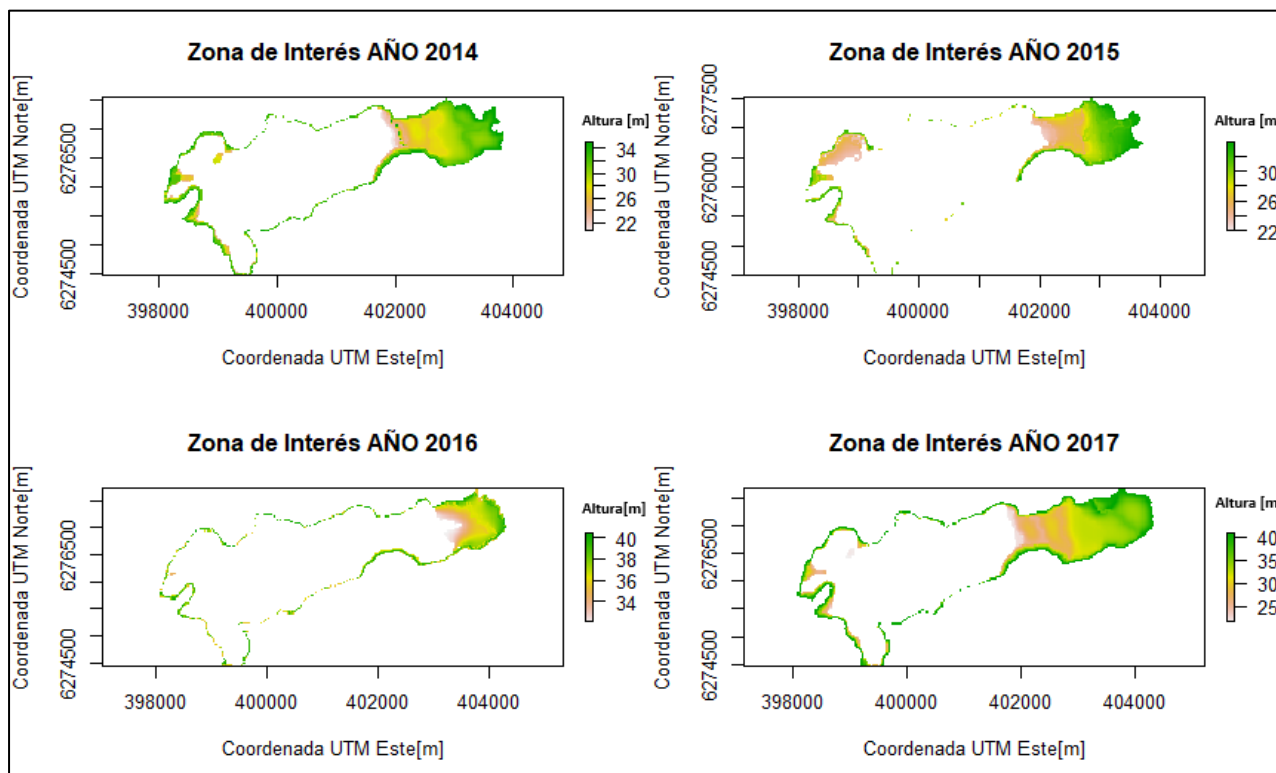
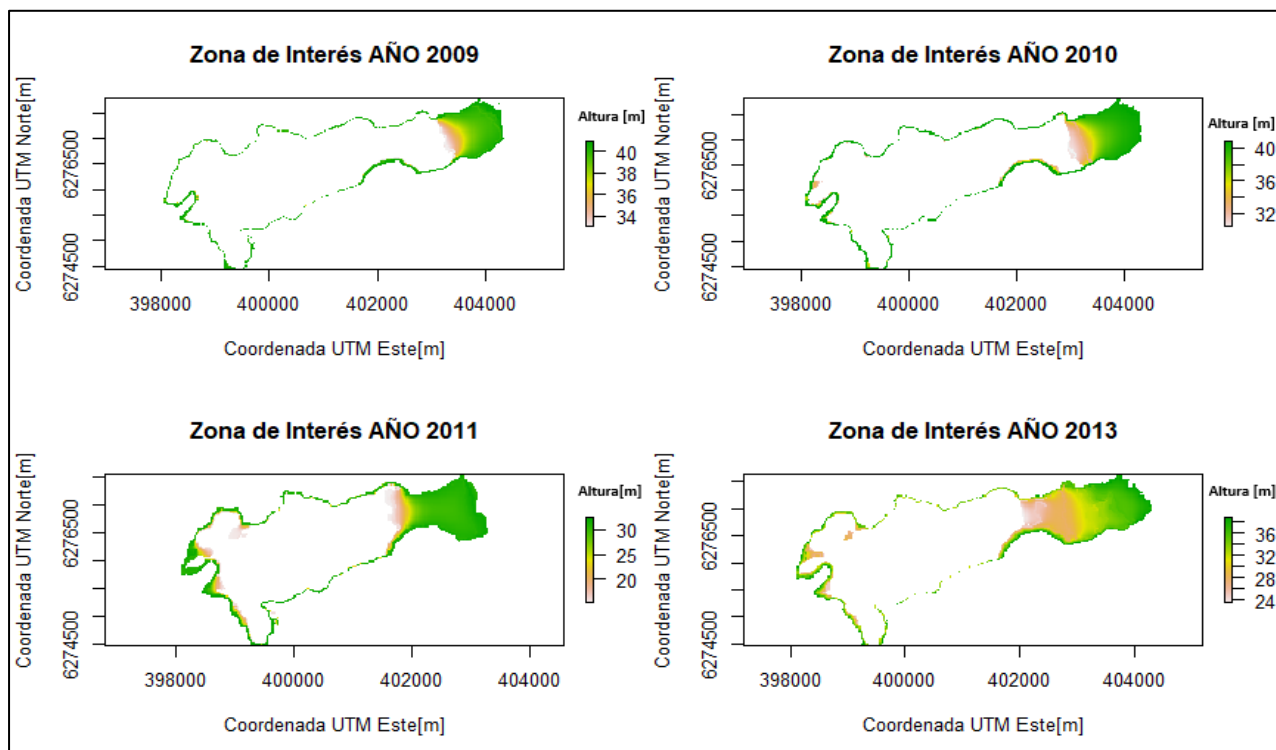
Cómo se logra observar, el error obtenido en la mayoría de los casos es inferior al 10%, lo que permite afirmar que el método utilizado para delimitar el embalse posee una gran precisión.

6.2 Generación DEM del embalse “El Yeso”.

Se generaron 19 archivos DEM del embalse, considerando el periodo 2000-2020. Se debe señalar que en los años 2003 y 2013 no se pudo generar archivos DEM, por una parte, en el primero de estos años no se contaba con la cantidad necesaria de imágenes satelitales procesadas; mientras que para el segundo simplemente no existió esta información, toda vez que como fue mencionado previamente, en este periodo existió una transición entre los satelitales Landsat 4 y Landsat 8.

A continuación, se presentan los archivos DEM generados para el periodo de estudio mencionado.





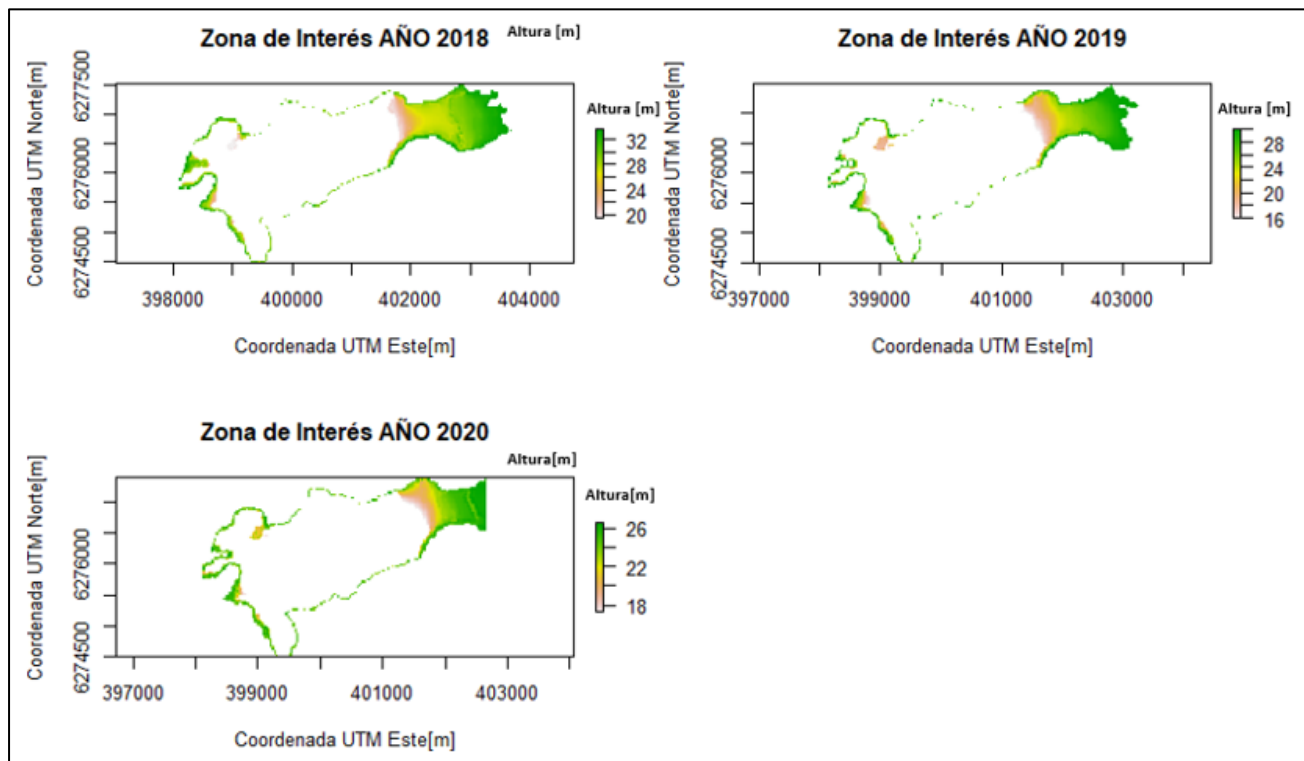


Figura N° 14 - Modelos Digitales de Elevación (DEM) para el embalse "El Yeso" durante el periodo 2000-2020.

Fuente: Elaboración Propia.

Es importante mencionar que, debido al hecho de que los modelos DEM son desarrollados a partir de una interpolación, es que la zona que se encuentra al interior del embalse no será válida para un análisis más detallado y solo sería aplicable para el sector comprendido entre la imagen satelital que presenta la zona con mayor y menor superficie en cada año.

6.3 Estimación de sedimentación

Para poder estimar el nivel de sedimentación, a lo largo del periodo de estudio, se procede a calcular la elevación media de los DEM generados en el sector de estudio. Los valores en cuestión se presentan en la Figura N° 15, en este, se logra observar una tendencia negativa para el periodo 2000-2020, correspondiente a un promedio en la acumulación de sedimentos de 54.09 cm/año ($R^2 = 0.63$, $n = 19$).

Se realizó una primera estimación del nivel de sedimentos que el río Yeso puede transportar para poder validar los resultados obtenidos, para este objeto se utilizaron las curvas de Fleming (Jimenez, 2016). Se opta por utilizar una fórmula empírica, por sobre información in-situ de sedimentación (que sería más precisa y confiable), puesto que no se posee información del transporte de sedimentos existentes en el río analizado.

A partir de la utilización de las curvas de Fleming, se obtiene un volumen teórico de sedimentos igual a 246,522.48 m³/año, mientras que la sedimentación obtenida en esta investigación es igual a 126,809.45 m³/año. En base a estos resultados, se logra concluir que los valores obtenidos se encuentran en el mismo orden de magnitud; sin embargo, el sector estudiado debería haber sido un poco mayor en su extensión. Es

importante mencionar que este valor de sedimentación teórica es una primera aproximación, por cuanto, al utilizar las ecuaciones de Fleming, se están obviando algunos aspectos que podrían tomar relevancia, como es la sedimentación de fondo. Por esta última razón, es que se vuelve necesario seguir investigando la sedimentación en embalses, generando así más información.

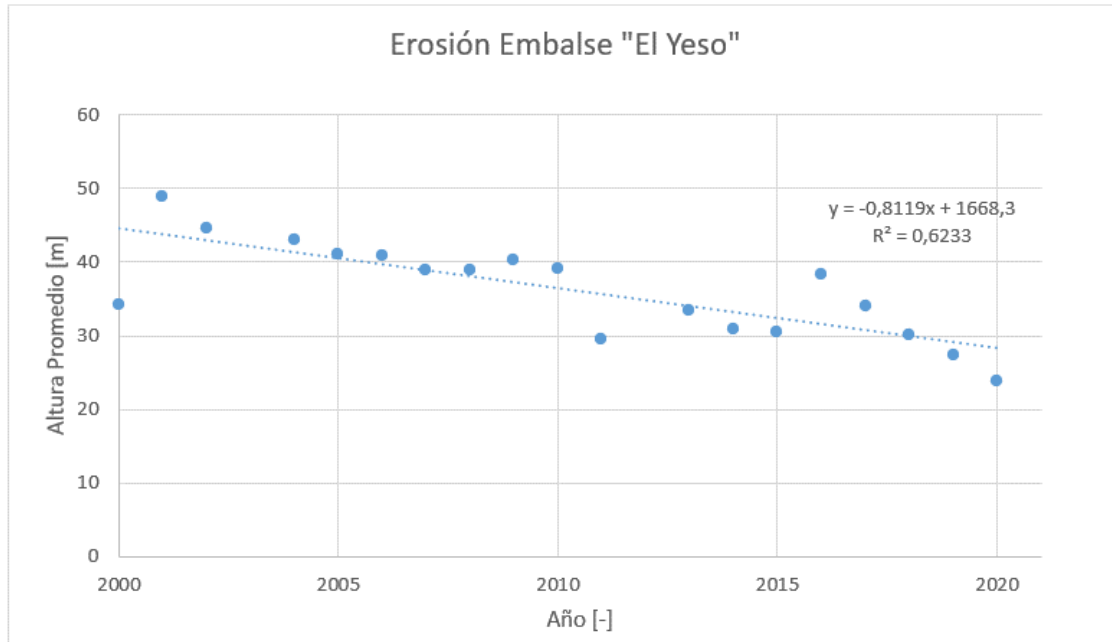


Figura N° 15 - Altura promedio para modelos de elevación (DEM) del embalse "El Yeso" para el periodo 2000-2020. diecinueve DEMs anuales fueron usados para realizar un ajuste lineal.

Fuente: Elaboración Propia

7 DISCUSIÓN

7.1 Interpretación de resultados

Este estudio, en primer lugar, determinó que el área del embalse “El Yeso”, desde aproximadamente el año 2010, ha sufrido una reducción relevante en su superficie, lo que puede ser atribuido a efectos del cambio climático. Esto puede ser afirmado toda vez que el aporte generado por los deshielos ha ido en constante disminución (Dionizis,2018; Mejias,2020; Fredricksen et al.,2010), lo que en el futuro puede llevar a problemas de abastecimiento para la región Metropolitana, ya que como fue mencionado, este embalse es una de las principales fuentes de agua potable para dicha división territorial.

El cambio climático es un fenómeno ya establecido en Chile (Rojas et al,2019) y el sector donde se encuentra el embalse “El Yeso” no está exento de esto. Tal como se logró evidenciar, la variable hidrológica de la

precipitación (Figura N° 3) es la principal responsable en los cambios de caudal que ingresa al embalse (

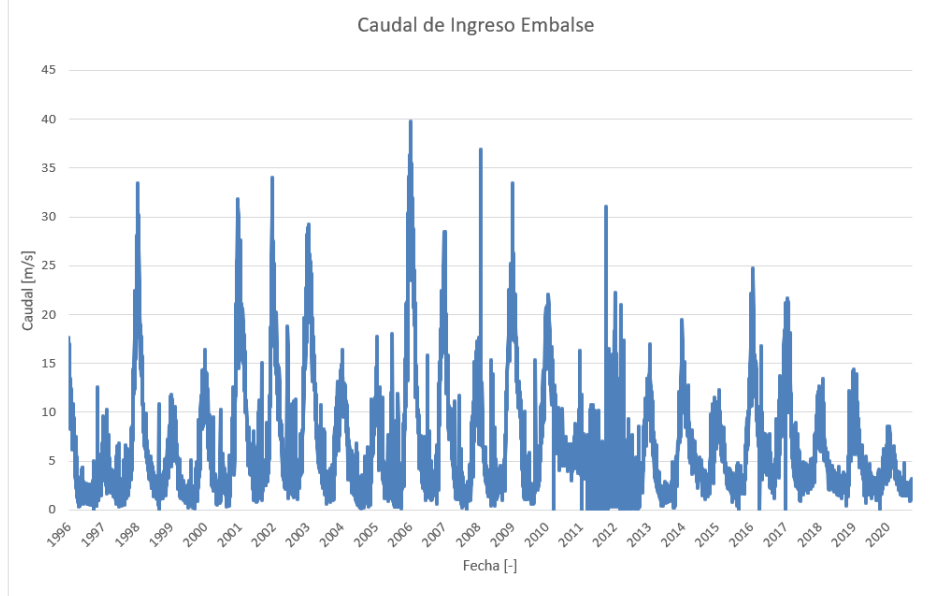


Figura N° 5), evidenciándose una notoria disminución desde el 2017 aproximadamente. Como consecuencia de esto, se logra observar que el embalse en estudio ha visto afectado tanto su superficie de agua como sus niveles a partir de dicho año.

Es relevante tener en consideración que las áreas obtenidas mediante los métodos de valor límite se acercaron en gran medida a los valores reales. De esta manera se puede afirmar que la evolución del área del embalse obtenida, a lo largo del tiempo de estudio, es la que está ocurriendo en la realidad. El efecto del cambio climático, donde la superficie del embalse ve reducida considerablemente a partir del año 2017, también se ve reflejada en la serie de tiempo obtenida para las imágenes procesada.

En general, la diferencia entre los valores reales del embalse y los obtenidos mediante los métodos de valor límite fueron menores al 12%, esto se debe principalmente al tamaño del píxel de la imagen satelital utilizada, puesto que pueden existir sectores que en realidad no corresponde a agua, pero que igualmente están siendo consideradas o viceversa. En esta investigación se trabajó con una resolución de 30m x 30m, en función de la disponibilidad existente; sin embargo, para obtener valores menores de errores se debería reducir la resolución espacial, ya que de esta manera los píxeles discretizan, de mejor manera, el suelo de la masa de agua.

Otro aspecto que se desprende de la diferencia entre los valores reales del embalse y los obtenidos en esta investigación, tiene relación a los métodos de thresholding utilizados, en este caso, Otsu (1979) y Kittler (1986). En primer lugar, estas dos metodologías fueron utilizadas por ser las que poseen mayor aceptación y uso para la delimitación de masas de agua en la bibliografía estudiada (Sezgin and Sankur, 2004; Zhang et al., 2015). Segundo, su aplicación es ideal ya que están pensados para imágenes en que el objeto buscado (en este caso la masa de agua) se encuentra fácilmente diferenciada (en escalas de intensidades) del objeto de fondo (en este caso suelo en los meses de verano y nieve en los meses de invierno). Por tanto, debido a estos dos aspectos mencionados y los resultados de la investigación, se puede afirmar que estos métodos poseen una gran precisión para masas importantes de agua.

Un aspecto que sería interesante aplicar en futuras investigaciones, es como los métodos thresholding funcionan para sistemas donde la masa de agua no se logra diferenciar claramente con el objeto de fondo. Algunos de estos casos son, por ejemplo, en aquellos donde la vegetación sea abundante o incluso donde la masa de agua no es de gran tamaño (pequeños ríos o esteros) (Luo, 2014; Bai, 2011). Asimismo, también

sería interesante analizar el grado de precisión que poseen otros métodos de delimitación, tales como los que están basados en entropía o atributos (Sezgin and Sankur,2004).

En conjunto con los métodos de Thresholding se utilizaron, en primer lugar, cinco índices (Rokni et al.,2014) y una banda espectral (Ryu et al.,2002). Segundo, en base a como se desarrollaba el proceso de delimitación de la masa de agua se optó por utilizar solo un índice en conjunto con la banda. En base a los resultados obtenidos, se puede indicar esta decisión fue correcta, ya que, por un lado, estos se acercaron en gran medida a los valores reales y, por otro, se logró optimizar el tiempo requerido para delimitar las imágenes satelitales, puesto que, se logró observar que algunos índices espectrales no entregaban resultados obtenidos, que algunos casos ni siquiera lograban delimitar la masa de agua del embalse.

En general, el uso de índices espectrales es un proceso dinámico, ya que es necesario ir viendo in-situ el que se acomoda de mejor manera a la situación, puesto que en general, cada uno de estos valores normalizados son utilizados para diferentes fines (Ji,2009). A esto hay que sumar que cada sector analizado posee características especiales, que pueden llegar influir en la intensidad captada por el satélite (vegetación abundante, existencia de nieve, etc), y que finalmente afectarán en los valores de índices obtenidos.

Posteriormente, en los modelos de elevación generados se logra observar que la altura promedio del embalse también ha sufrido reducciones considerables, por cuanto como se observa en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en el año 2001 el embalse poseía una altura promedio de 41 metros aproximadamente y para el año 2020 este valor se redujo de forma importante hasta llegar al valor de 25 metros, lo que grafica una reducción de 16 metros en 20 años aproximadamente.

Con respecto a la explicación de los resultados obtenidos de la altura promedio, estos no se pueden atribuir a un factor de cambio climático en gran medida, por cuanto, como se logra observar en la Figura N° 15, la reducción ocurre durante todo el periodo de estudio con la misma tendencia. En contraparte, se visualiza que la superficie del embalse tiene una tendencia negativa solo a partir del 2013, existiendo valores constantes con anterioridad a este año. Por tanto, se atribuye la reducción en la altura del embalse a una sedimentación, considerando además que el sector en estudio corresponde a donde el río Yeso alimenta al embalse.

Por todo lo mencionado anteriormente, se comprueba el objetivo principal de esta investigación: la topografía del embalse “El Yeso”, específicamente en el sector más cercano a la desembocadura del río homónimo, ha presentado un proceso de sedimentación con una tasa promedio 66.15 cm/año durante el periodo 2000-2020. A simple vista, se puede llegar valores elevados de sedimentación por año; no obstante, para poder tener una idea clara del nivel de sedimentos transportados por el río Yeso, se deben utilizar las curvas de Fleming.

Cuando se procede a comparar el valor de sedimentación teórica (246,522.48 m³/año) con el experimental (126,809.45 m³/año) se observa que ambos se encuentran en la misma magnitud, por lo que el valor obtenido de sedimentación no se encuentra alejado de lo que en la realidad está ocurriendo en el embalse.

La existencia de sedimentación en el embalse conlleva a una disminución de la capacidad efectiva de agua que este puede acumular (Gonzalez.,2020), además de la reducción generada por el cambio climático. Esto último agrega una nueva variable que en el futuro debería ser estudiada para una mejor gestión de los embalses y, en general, de cualquier masa de agua.

Otro aspecto, que se desprende de esta investigación, es la elevada cantidad de sedimentos que se transportan en el río Yeso (Gonzalez,2020). Esto se encuentra de acuerdo con lo que se debería presumirse de la propia naturaleza de este río, toda vez que se emplaza en una cuenca montañosa, en la que el nivel de sedimentos existentes tiende a ser alto (Arriagada et.,2015)

Una aplicación, que se desprende de esta investigación y que se encuentra relacionada con el transporte de sedimentos, es analizar cómo estos últimos varían en un mismo río (Chalov et al.,2015). En este punto se debe ver si la cantidad de sedimentos transportados desde el nacimiento de un río es igual, en cantidad, en

la desembocadura de este o en otros puntos de interés. De este tema se desprende otro igualmente importante, que consiste en estudiar cómo los embalses pueden llegar a influir en este proceso de transporte (Ren et al.,2020; Walling.,2009; Yang et al.,2018), toda vez que estas construcciones pueden llegar a generar que sedimentos que antes llegaban a las desembocaduras de los ríos ahora se acumulen en un sector específico (Sanz,1999), pudiendo originar consecuencias medioambientales que no son tenidas en consideración.

La comparación de sedimentación entre embalses (Mau,2000), con diferentes características geográficas, también es algo importante que debiese realizarse a futuro (Flores et al.,2017). En el caso en estudio, el embalse “El Yeso” se encuentra dentro de una cuenca montañosa, por lo que se presume que la cantidad de sedimentos existentes será mayor que en otras obras emplazadas en lugares distintos, como por ejemplo el embalse Rapel. De esta forma, se podría llegar a establecer valores de sedimentación dependiendo del sector donde se encuentre un embalse.

Finalmente, un aspecto que es importante discutir en esta investigación es la nula cantidad de estudios que analicen la variación que han sufrido los embalses en sus niveles de almacenamiento, ya que en general, los existentes se encuentran relacionados a otros aspectos. Este punto es relevante, por cuanto estudiar cómo los embalses han ido variando sus niveles de almacenamiento (Gao,2012) y qué tanto han sido afectados por el cambio climático (Brekke et al., 2009). Todo esto permitiría determinar qué tan efectivos están siendo hoy en día al momento de almacenar el recurso hídrico y si el uso de embalses es sostenible en este escenario (Sen,2021).

7.2 Limitaciones de la investigación

Una de las primeras limitaciones que se presente en esta investigación es la cantidad de imágenes satelitales a procesar, puesto que la generación de los archivos de elevación (DEM) depende de la superficie delimitada a partir de esta información y, por consiguiente, la estimación de la sedimentación. Por tanto, para un estudio más acabado se requeriría obtener un mayor número de imágenes para procesar, como también, que estas logren abarcar todos los meses del año. Este último punto toma vital relevancia, ya que, por ejemplo, si en un año determinado se carece de la información del período de menor superficie del embalse al momento de realizar la interpolación espacial, se podría generar un error importante en el archivo DEM generado. En este documento en concreto, el número de imágenes satelitales obtenidas abarcó ambos puntos mencionados previamente.

En relación con lo anterior, otro aspecto que se puede mejorar a futuro sería la reducción del margen de error existente entre los valores reales y los obtenidos con las imágenes satelitales usadas y los métodos Thresholding. En este sentido, a pesar de que en esta investigación los valores calculados son aceptables (menores al 12% y, en general, menores al 8%), se podría reducir este error usando imágenes satelitales con mejores resoluciones, toda vez que los píxeles estarían más discretizados. Esto último implicaría diferenciar, de mejor manera, los sectores con agua de aquellos con suelo, permitiendo ser el primer filtro para conseguir la superficie de las masas de agua.

Como se ha comentado anteriormente, en esta investigación se trabajó con píxeles de 30mx30m. A pesar de que satélites como Sentinel presentan mejores resoluciones de 10mx10m, este solo presentaba imágenes desde el año 2017 aproximadamente, lo que correspondía a un período de estudio insuficiente al que se buscaba en este documento. Por esta razón, se prefirió usar las imágenes presentadas previamente, que, si bien tienen una peor resolución, permitieron abarcar un lapso temporal de análisis mayor.

Otro aspecto que puede ser fuente de error tiene relación a la zona interpolada que se encuentra fuera de las superficies límites de las imágenes trabajada (zona que se encuentra al interior del límite de la imagen satelital con menor superficie obtenida), por cuanto fuera de este sector, los resultados entregados ya no serían válidos (se posee solo un valor de frontera válido para poder interpolar). Para poder eliminar este error, sería necesario poseer una imagen satelital en la que el embalse se encuentre a una capacidad mínima, lo que permitirá entregar una mejor interpolación en el sector central del embalse. Lo anterior, en la práctica, depende únicamente de cómo la capacidad del embalse varíe a lo largo del tiempo; sin embargo, este error sería relevante al momento de realizar un análisis detallado de sedimentación en ese sector. Todo lo mencionado trae, como posibilidad para el futuro, la obtención de un muestreo más amplio del sector de la obra, lo que permitirá generar archivos DEM más robustos y discretizar por zonas en función de la sedimentación producida.

Una vez conseguida la sedimentación teórica, se logra observar en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que en el año 2000 se presenta una altura promedio considerablemente menor a los periodos de 2001 y 2002, lo que genera una reducción importante en el grado de ajuste de las variables altura promedio-año; sin embargo, esta alteración ocurrida se atribuye a un balance negativo entre el volumen que ingresa y egresa del embalse.

Igualmente, como ha sido patente durante esta investigación, se debe mencionar la nula existencia de información sedimentológica existente en la estación sedimentológica existente en el embalse (Soto,2020), lo que no permite poder realizar una comparación exacta entre los valores teóricos obtenidos y los que realmente ocurren en el río Yeso. Las fórmulas de Fleming utilizadas solo posibilitan entregar una primera aproximación de los valores teóricos, por cuanto esta formulación no considera parámetros relevantes en los casos de cuencas montañosas, como lo es el caudal sólido de fondo. A esto se añade el hecho de que se presente, de forma inherente, un porcentaje de error considerable.

Finalmente, en base a todo lo mencionado previamente, la principal limitación que se presentó en esta investigación es el poco estudio que ha existido en las cuencas montañosas, los principales estudios son respecto al embalses en el Lago Rapel (Lecaros,2011; Benitez,1984), el cual no presenta las mismas condiciones que el estudiado. Por tanto, queda como tarea para futuros estudios, el poner énfasis en fórmulas y metodologías para el cálculo de la sedimentación aplicado a las cuencas montañosas de Chile, evaluando también el grado de precisión que estas presentan y generar más información sedimentológica.

8 CONCLUSIONES

En la actualidad y en base a la literatura analizada se ha podido visualizar que el estudio de la sedimentación en los embalses ubicados en las cuencas montañosas de Chile no ha sido muy desarrollado, por esta razón es que esta investigación ha buscado entregar un primer análisis de la existencia de sedimentación en una de estas obras, específicamente del embalse “El Yeso”. Para lograr este objetivo fueron construidos modelos digitales de elevación (DEM) de la topografía de esta estructura, a través del uso de imágenes satelitales que dieron información para un estudio del periodo correspondiente desde el año 2000 al 2020.

Partiendo con lo conseguido en esta investigación, se logró concluir que el uso de imágenes satelitales, en complemento con métodos de valor límite, son una herramienta efectiva para delimitar masas de cuerpo de agua con gran precisión, además de poder trabajar con una resolución temporal elevada, que permite generar análisis más robustos. El error obtenido entre el área real y experimental, al ser en la mayoría de los casos menor al 10%, demuestra la gran precisión que se tiene al utilizar estos métodos.

Otro punto que pudo desprenderse de este estudio es la existencia de sedimentación en el embalse “El Yeso”, lo que explicaría el proceso de reducción en su topografía, más allá de la existencia de la variable correspondiente al cambio climático. Sobre este último, se pudo mencionar que sus efectos se ven

claramente a partir del año 2013, mientras que la reducción de los niveles de agua es un proceso que se logra observar durante todo el periodo de investigación, con una tendencia negativa constante.

Prosiguiendo, se logró determinar una tendencia en la sedimentación en el periodo de estudio, obteniéndose un valor de 66.15 cm/año. Este proceso en la topografía del embalse es atribuido al carácter montañoso del río aportante, principalmente por los sedimentos existentes en el fondo de este último. Este valor calculado, a pesar de considerarse elevado, se encuentra dentro de los rangos esperables en referencia con las cifras de sedimentación teóricos obtenidos.

Con respecto a la comparación entre los valores reales y los teóricos que fueron obtenidos, en esta investigación se pudo realizar una verificación; sin embargo, es menester recordar la dificultad de lograr una estimación teórica de la sedimentación real exacta que debería haber en el embalse en cuestión. La razón de esta última afirmación tiene su justificación en algo que se ya mencionó previamente, y es que este tema, en nuestro país, ha sido pobremente estudiado, por lo que no existen datos en terreno de la sedimentación de fondo que realmente los ríos traen consigo.

Por lo mismo, es importante que en Chile se vayan generando más estudios sobre este tema del transporte de sedimentos, específicamente en cuencas montañosas. La realización de estos análisis logrará permitir la generación de relaciones empíricas para la estimación de la sedimentación de fondo en este tipo de cuencas presentes en el país, lo que se puede complementar con el uso de herramientas remotas (como son las imágenes satelitales) e información obtenida en el lugar de interés. En la actualidad, las principales investigaciones relacionadas se enfocan generalmente en los sedimentos de suspensión, lo que no basta en el caso de las cuencas ubicadas en montañas, toda vez que estos lugares presumen que el transporte de fondo es una variable relevante y con mayor importancia que dicha clase de sedimentos.

El transporte de sedimentos y el uso de imágenes satelitales tienen una gran cantidad de aplicaciones, tanto en conjunto como por separado, que podrían ser utilizadas en el futuro. Su desarrollo permitiría, por ejemplo, comprender, de mejor manera, el cómo los embalses pueden afectar al ecosistema desde el punto de vista del transporte de sedimentos; o también, poder establecer diferencias entre la sedimentación esperada entre una de estas obras ubicada en una montañosa, en comparación a otra ubicada en una zona con distintas características geográficas. Finalmente, también se podría establecer como estos sedimentos varían a lo largo de un río, considerándolo desde su nacimiento hasta la desembocadura.

En resumen, con esta investigación se ha logrado entregar una primera estimación de la sedimentación en un cuerpo de agua específico. Asimismo, también ha quedado manifiesta la gran necesidad de poseer información en terreno, puesto que, por un lado, permite generar modelos de elevación con mayor precisión y, por otro, posibilita comparar los resultados experimentales con los empíricos.

9 REFERENCIAS

- Acharya, T. D., Subedi, A., & Lee, D. H. (2018). Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal. *Sensors*, 18(8), 2580.
- Ambrosio, G. R. E. G. O. R. I. O., González, J. A. V. I. E. R., & Arévalo, V. I. C. E. N. T. E. (2002). Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal. Málaga, España
- Arriagada, C., Vargas, G., González, J., Gómez, I., Peña, M., Villalobos, A. & Bascuñan, S. (2015). Geología del valle del río Yeso. GL-6101. GEOLOGIA DE CAMPO II. Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile
- Bai, J., Chen, X., Li, J., Yang, L., & Fang, H. (2011). Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. *Environmental monitoring and assessment*, 178(1), 247-256.
- Benitez, A. (1984). “Estimación de la sedimentación en el embalse Central Rapel, Endesa”.
- Berdugo Muñoz, A. (2016). Análisis multiespectral de imágenes satelitales para evaluar variaciones espacio-temporales en la calidad del agua del embalse el Guájaro, Atlántico (Doctoral dissertation).
- Brekke, L. D., Maurer, E. P., Anderson, J. D., Dettinger, M. D., Townsley, E. S., Harrison, A., & Pruitt, T. (2009). Assessing reservoir operations risk under climate change. *Water Resources Research*, 45(4).
- Caldwell, D. R. (2005). Unlocking the mysteries of the bounding box.
- De MOUSTIER, C. (1988). State of the art in swath bathymetry survey systems.

- Dionizis Rojo, D. P. (2018). Análisis de las proyecciones de recursos hídricos aportantes a los sistemas Embalse El Yeso y Laguna Negra bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5.
- Figuerola, H., & Alejandro, R. (2003). Gestión ambiental para la construcción de un embalse, caso de estudio embalse Miraflores.
- Flórez Molina, M. T., Parra Sánchez, L. N., Bolaños Benítez, S. V., Gallo Sánchez, L. J., Poveda Sáenz, A., & Agudelo Echavarría, D. M. (2017). Caracterización de los Sedimentos de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín, Colombia.
- Fredericksen, N., Astorga, B. & Morales, F. (2010). Santiago Andino. La mayor reserva natural de agua de la Región Metropolitana. Sistemas de Producción Sustentable para Ecosistemas de Montaña. Registro N° 200.236. Santiago de Chile: Registro de Propiedad Intelectual de Chile.
- Gao, H., Birkett, C., & Lettenmaier, D. P. (2012). Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resources Research*, 48(9).
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439.
- Gautam, V. K., Gaurav, P. K., Murugan, P., & Annadurai, M. J. A. P. (2015). Assessment of surface water Dynamicsin Bangalore using WRI, NDWI, MNDWI, supervised classification and KT transformation. *Aquatic Procedia*, 4, 739-746.
- González-Muzzio, C., & Vidal, C. R. (2020). La Gestión de Riesgos en los Destinos Turísticos de Montaña en Chile: El Caso del Embalse El Yeso. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres–REDER*, 4(1), 1-20.
- Gomez,A. (2013). Analisis de los metodos e instrumentación utilizada en batimetría
- Iroume, A. (2003). Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 24(1), 125-135.
- Jelev, G. (2020). Water Surface Dynamic's of The Studena Dam, Pernik Using Sentinel 2a and 2b Satellite Data. *Aerospace Research in Bulgaria, Space Research Institute*, (32), 34-40.
- Jimenez Pereira, I. R. (2016). Estimación de curvas de caudal solido en suspensión y comparación con expresiones empíricas de fleming y manual de presas pequeñas.
- Ji, L., Zhang, L., & Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307-1317.
- Kittler, J., & Illingworth, J. (1986). Minimum error thresholding. *Pattern recognition*, 19(1), 41-47.
- Lecaros Sánchez, M. H. (2011). Estudio de sedimentación en el embalse Rapel.
- Liu, Y., Li, M., Mao, L., Cheng, L., & Li, F. (2013). Toward a method of constructing tidal flat digital elevation models with MODIS and medium-resolution satellite images. *Journal of Coastal Research*, 29(2), 438-448.
- Lu, S., Wu, B., Yan, N., & Wang, H. (2011). Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3), 428-434.
- Luo, J., Ma, R., Duan, H., Hu, W., Zhu, J., Huang, W., & Lin, C. (2014). A new method for modifying thresholds in the classification of tree models for mapping aquatic vegetation in Taihu Lake with satellite images. *Remote Sensing*, 6(8), 7442-7462.

- Mau, D. P. (2000). Comparison of sediment deposition in reservoirs of four Kansas watersheds. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Mason, D. C., Davenport, I. J., Flather, R. A., Gurney, C., Robinson, G. J., & Smith, J. A. (2001). A sensitivity analysis of the waterline method of constructing a digital elevation model for intertidal areas in ERS SAR scene of eastern England. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(6), 759-778.
- Mejías Acuña, A. (2020). Variación del volumen del glaciar El Morado, según observaciones y modelamiento entre los años 2010 y 2018.
- Nath, R. K., & Deb, S. K. (2010). Water-body area extraction from high resolution satellite images-an introduction, review, and comparison. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 3(6), 265-384.
- Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 4(3), 313-332.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, 9(1), 62-66.
- R Chalov, S., Jarsjö, J., Kasimov, N. S., O Romanchenko, A., Pietroni, J., Thorslund, J., & Promakhova, E. V. (2015). Spatio-temporal variation of sediment transport in the Selenga River Basin, Mongolia and Russia. *Environmental Earth Sciences*, 73(2), 663-680.
- Ren, J., Zhao, M., Zhang, W., Xu, Q., Yuan, J., & Dong, B. (2020). Impact of the construction of cascade reservoirs on suspended sediment peak transport variation during flood events in the Three Gorges Reservoir. *Catena*, 188, 104409.
- Rojas, M., Aldunce, P., Farías, L., González, H., Marquet, P. A., Muñoz, J. C., ... & Vicuña, S. (2019). Evidencia científica y cambio climático en Chile: resumen para tomadores de decisiones.
- Rokni, Komeil, et al. "Water feature extraction and change detection using multitemporal Landsat imagery." *Remote sensing 6.5* (2014): 4173-4189.
- Ryu, J. H., Won, J. S., & Min, K. D. (2002). Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat: a case study in Gomso Bay, Korea. *Remote sensing of Environment*, 83(3), 442-456.
- Sanz, M.E., Avendaño, C. & Cobo, R. (1999): Influencia de los embalses en el transporte de sedimentos hasta el delta del río Ebro (España). *Manaus '99. Symposium on Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basins (CDRom)*
- Şen, Z. (2021). Reservoirs for water supply under climate change impact—a review. *Water Resources Management*, 35(11), 3827-3843.
- Sezgin, M., & Sankur, B. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic imaging*, 13(1), 146-165.
- Soto Rivas, K (2020). Análisis Crítico de la red de sedimentos de la DGA.
- Soydan, O. (2020). Determination of Water Surface and Vegetation Change in Akkaya Reservoir Basin Using Remote Sensing Method. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(5), 1174-1180.
- Uribe, F. (2015). Comparación de la cobertura nival e hidrogramas simulados a distintas escalas temporales en la cuenca alta del río Maipo, por distintas conceptualizaciones del proceso nival. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.
- Walling, D. E. (2009). The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges.

- Yang, X., Sun, W., Li, P., Mu, X., Gao, P., & Zhao, G. (2018). Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities. *Science of the total environment*, 642, 591-600.
- Yao, F., Wang, J., Wang, C., & Crétaux, J. F. (2019). Constructing long-term high-frequency time series of global lake and reservoir areas using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 232, 111210.
- Zhang, S., Liu, Y., Yang, Y., Sun, C., & Li, F. (2016). Erosion and deposition within Poyang Lake: evidence from a decade of satellite data. *Journal of Great Lakes Research*, 42(2), 364-374.
- Zhou, W., Li, Z., Ji, S., Hua, C., & Fan, W. (2014, October). A new index model NDVI-MNDWI for water object extraction in hybrid area. In *International Conference on Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem* (pp. 513-519). Springer, Berlin, Heidelberg.

10 ANEXOS

Tabla N° 4 - Estaciones utilizadas para ajuste de parámetros, zona centro.

Fuente: Estimación de curvas de caudal sólido en suspensión y comparación con expresiones empíricas de Fleming y manual de presas pequeñas, Jiménez 2016.

N°	Coordenada X	Coordenada Y	Nombre	Código BNA
1	305135	6564596	Río Cogoti entrada Embalse Cogoti	04531002-7
2	349701	6461905	Río Choapa en Cuncumen	04703002-1
3	315530	6601163	Río Grande en Puntilla San Juan	04523002-3
4	307313	6630564	Río Hurtado en Angostura de Pangue	04503001-6
5	351699	6686449	Río Turbio en varillar	04308001-6
6	358627	6364404	Río Aconcagua en Chacabuquito	05410002-7
7	378433	6357854	Río Blanco en Río Blanco	05402001-5
8	351459	6402847	Río Putaendo en Resguardo Los Patos	05414001-0

9	372992	6282318	Río Colorado antes Junta Río Maipo	05707002-1
10	371831	6281743	Río Maipo en El Manzano	05710001-K
11	363537	6307064	Río Mapocho en los Almendros	05722002-3
12	331232	6292177	Río Mapocho rinconada de Maipú	05737002-5
13	332714	6156655	Río Tinguiririca bajo Los Briones	06028001-0
14	249163	6054574	Río Loncomilla en Las Brisas	07359001-9
15	333524	6125611	Río teno después de junta con claro	07104002-K

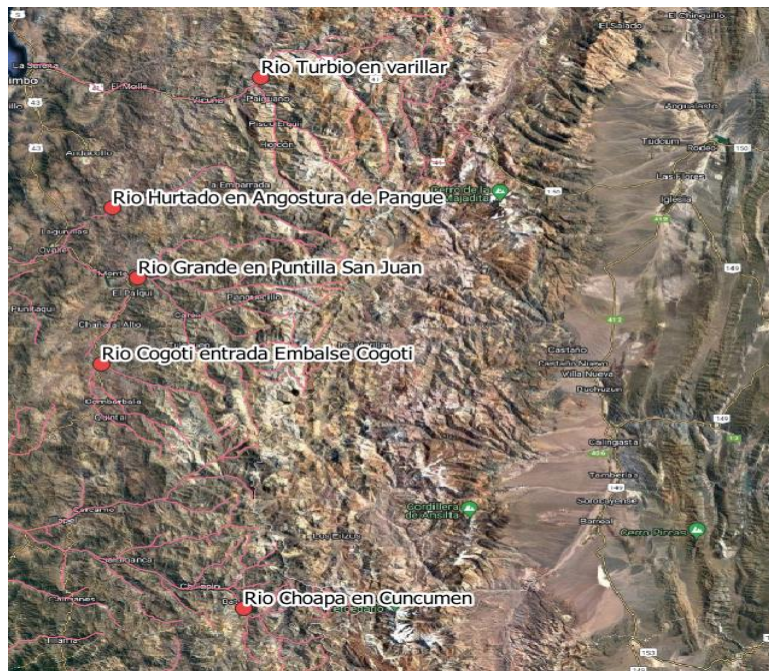


Figura N° 16 - Estaciones Utilizadas Ajuste Zona Centro.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 17 - Estaciones Utilizadas Ajuste Zona Centro.

Fuente: Elaboración Propia.



Figura N° 18 - Estaciones utilizadas ajuste zona centro.

Fuente: Elaboración Propia.