



“USO MULTISENSOR DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL MONITOREO MULTITEMPORAL DE LA LAGUNA PALCACOCHA”

Edward Farfán Vargas¹

Jesús Quintana Ortiz²

Entidades Participantes:

¹ Centro de Estudios, Procesamiento de Información e Investigación para la Gestión

Reactiva CEPIG - INDECI

² Dirección de Aplicaciones Espaciales y Geomática DIAPG – CONIDA

Diciembre, 2021



INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL (INDECI)

General de División Carlos Manuel Yáñez Lazo

Jefe del Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI

Econ. César Augusto Negrete Venegas

Secretario General del Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI

Lic. Silvia Yanina Passuni Pineda

Coordinadora (e) del Centro de Estudios, Procesamiento de Información e Investigación para la Gestión Reactiva

Responsable de Investigación:

Lic. Silvia Yanina Passuni Pineda

Equipo Técnico:

Ing. Edward Farfán Vargas (CEPIG - INDECI)

Bach. Jesús Quintana Ortiz (DIAPG - CONIDA)



Agradecimientos

Un agradecimiento a la Agencia espacial del Perú – CONIDA en especial a la Dirección de Aplicaciones Espaciales y Geomática DIAPG, por brindar las facilidades en la obtención de las imágenes satelitales requeridas y su apoyo técnico en la elaboración de la presente investigación.



INDICE

1	Diseño de la Investigación.....	3
1.1	Introducción	3
1.2	Planteamiento del Problema.....	6
1.3	Justificación	6
1.4	Objetivos	7
1.4.1	Objetivo General.....	7
1.4.2	Objetivo Especifico.....	7
1.5	Área del estudio	8
2	Metodología.....	10
2.1	Insumos	10
2.1.1	Imágenes del Satélite Spot 6	10
2.1.2	Imágenes del Satélite Peruano PeruSAT-1	12
2.1.3	Levantamiento Batimétrico y Topográfico	14
2.2	Preprocesamiento (Teledetección).....	16



2.2.1	Corrección Geométrica	16
2.3	Procesamiento (Teledetección)	19
2.3.1	Generación del índice para la delimitación de la superficie de Agua	19
2.3.2	Determinación del Umbral	22
2.3.3	Delimitación de la superficie de la laguna Palcacocha	23
2.4	Preprocesamiento (SIG)	25
2.4.1	Exportando a formato shp	25
2.5	Procesamiento (SIG)	26
2.6	Estimación del nivel de la superficie de agua de la laguna Palcacocha	28
3	Resultado	31
4	Validación	35
4.1	Validación de la clasificación	35
4.2	Validación de la Estimación del Nivel del Agua	37
5	Conclusiones	39
6	Recomendaciones	40
7	Bibliografía	42
8	Anexos	44
8.1	Iniciar el programa Envi 5.3	44



INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Imagen multiespectral del Área del Proyecto – Laguna Palcacocha	9
Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología.....	10
Figura N° 3 Imagen multiespectral del satélite Spot 6 de fecha de adquisición 28/04/16..	12
Figura N° 4 Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1 de fecha de adquisición 14/02/21	14
Figura N° 5 Información de los datos Topobatimétrico del Área del Proyecto	16
Figura N° 6 Imagen multiespectral del satélite Spot6 sin Georeferenciación.....	17
Figura N° 7 Imagen multiespectral del satélite Spot6 Georeferenciada	18
Figura N° 8 Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1 sin Georeferenciación.....	18
Figura N° 9 Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1 Georeferenciada.....	19
Figura N° 10 Índice NDWI en la imagen satelital Spot 6	21
Figura N° 11 Índice NDWI en la imagen Satelital PeruSAT-1	21
Figura N° 12 Umbral de 0.2 a 0.76 en la Imagen satelital Spot 6.....	22
Figura N° 13 Umbral de 0.2 a 0.73 en la Imagen satelital PeruSAT-1	23
Figura N° 14 Delimitación de la Laguna Palcacocha en la Imagen satelital Spot 6	24
Figura N° 15 Delimitación de la Laguna Palcacocha en la Imagen satelital PeruSAT-1 ...	24
Figura N° 16 Datos Topobatimétrico exportados a formato shp.	25
Figura N°17 Generación de TIN (método de Interpolación Espacial)	27



Figura N°18 Generación de Modelo de Elevación Digital – DEM.....	28
Figura N° 19 Estimación de la Elevación del nivel del agua de la laguna con la imagen PeruSAT-1	31
Figura N° 20 Estimación de la Elevación del nivel del agua de la laguna con la imagen Spot 6	32
Figura N° 21 Delimitación de la laguna con la imagen Spot 6 de fecha de adquisición abril 2016	33
Figura N° 22 delimitación de la laguna (abril 2016) se le ha superpuesto la imagen Perúsat1 de febrero del 2021.....	33

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 1 Características técnicas de la Imagen multiespectral del satélite Spot6	11
Tabla N° 2 Características técnicas de la Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1	13



USO MULTISENSOR DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL MONITOREO MULTITEMPORAL DE LA LAGUNA PALCACOCHA

Resumen

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en cooperación inter- institucional entre el Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI, por medio del Centro de Estudios, Procesamiento de Información e Investigación para la Gestión Reactiva – CEPIG y la Agencia Espacial del Perú - CONIDA a través de la Dirección de Aplicaciones Espaciales y Geomática DIAPG.

El propósito principal de este trabajo de investigación consistió en desarrollar una metodología que permita determinar el nivel de agua de las lagunas altoandinas en riesgo de desembalse mediante el análisis de caso de la laguna Palcacocha, localizada en el departamento de Ancash, mediante el monitoreo satelital multitemporal utilizando imágenes multiespectrales y un Modelo Digital de Elevación - DEM.

La primera parte de trabajo consistió en delimitar y vectorizar la distribución espacial de la laguna Palcacocha haciendo uso de la teledetección, aprovechando las bandas espectrales que brinda los diferentes satélites multiespectrales que componen el Sistema Satelital Peruano (PeruSAT-1 y Spot6). Para este trabajo se utilizó el Índice Diferencial de Agua Normalizado o por sus siglas en inglés NDWI propuesto por McFeeters en 1996, que emplea la banda verde y la banda del infrarrojo cercano (NIR) para detectar y delimitar superficie de agua.

La segunda parte del proceso, se utilizó las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica – SIG (software ArcGIS) con la finalidad de generar el Modelo de Elevación Digital – DEM en base a una Red de Triángulos Irregulares – TIN, aprovechando la Información del



Levantamiento Topobatimétrico generado por la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua -ANA. La metodología consistió en extraer la información altitudinal (valor z) del Modelo Digital de Elevación – DEM a un archivo vectorial de puntos (delimitación de la laguna) para determinar el nivel del agua de la Laguna Palcacocha en el momento de la adquisición de la imagen.

La validación de la información obtenida en esta metodología fue cotejada con los resultados obtenidos en el levantamiento Topobatimétrico realizado por la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA, realizado en febrero del 2016.



1 Diseño de la Investigación

1.1 Introducción

En los últimos años, los efectos del cambio climático y el aumento de la temperatura en el mundo están originando dos amenazas muy pronunciadas; la disminución de los glaciares que son los reservorios naturales de agua dulce y el incremento del tamaño de las lagunas altoandinas como consecuencia del retroceso de glaciares, sobre todo en la Laguna Palcacocha ubicada en el departamento de Ancash - Perú.

Este estudio busca validar una metodología que permita el monitoreo del nivel de las lagunas altoandinas con potencial desbordamiento, mediante el uso de data satelital. La laguna Palcacocha es de origen glacial y un posible desembalse podría poner en peligro a la ciudad de Huaraz, en el departamento de Ancash, afectando además el medio ambiente y sobre todo tendría efectos negativos muy altos a las poblaciones que se encuentran a sus faldas.

A la fecha se han perfeccionado diversas técnicas para la delimitación de cuerpos de agua a partir de imágenes de satélite entre ellas tenemos a las clasificaciones (supervisadas y no supervisadas), los ratios y los índices espectrales entre bandas.

La delimitación de la superficie de agua del área de estudio (Laguna Palcacocha) se realizó haciendo uso de técnicas de teledetección, utilizando para esta investigación el índice diferencial de agua normalizado o NDWI propuesto por McFeeters, 1996, el cual señala que el NDWI “...es un método desarrollado para delinear características de agua abierta y realzar la presencia de tales atributos, al tiempo que elimina la presencia de rasgos de suelo y de la vegetación terrestre, hace uso de la radiación infrarroja cercana reflejada y de la luz verde visible”. Este Índice espectral



brinda herramientas para la detección y registro de la distribución espacial de los cuerpos de agua, para nuestro caso la delimitación de la laguna Palcacocha. Las imágenes que fueron proporcionados por la Agencia Espacial del Perú -CONIDA y se utilizaron para este estudio son: una imagen del satélite Spot 6 de 6 m. de resolución espacial en las bandas multiespectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) y 1.5 m. de resolución espacial en la banda pancromática de fecha de adquisición abril del 2016 y una imagen del satélite Peruano PeruSAT-1 de 2.8 m. de resolución espacial en las bandas multiespectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) y 0.7m. en la banda pancromática, de fecha de adquisición febrero del 2021, estas imágenes pasaron por un pre-procesamiento (corrección radiométrica, geométrica y atmosférica) propias de cada satélite para luego emplear técnicas de teledetección para la delimitación del área de estudio.

La segunda parte del trabajo de investigación, se basó en la utilización de los datos del levantamiento topobatimétrico realizado por la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA en el año 2016 con el propósito de generar un Modelo de Elevación digital – DEM, utilizando las herramientas de los Sistemas de Información Geográfica-SIG específicamente el software ArcGIS. Esta información fue procesada empleando el método de Interpolación Espacial de Red de Triángulos Irregulares – TIN, partiendo del principio de la Primera Ley de la Geografía planteada por Waldo R. Tobler, (1969) el cual indica que “Geográficamente todos los lugares están relacionados, pero los lugares más cercanos están más relacionados que los lugares lejanos”, esta afirmación indica que la interpolación espacial de datos se fundamenta en la predicción de valores desconocidos de una variable espacial que puede ser precipitación, temperatura, elevaciones, etc., a partir de otros valores conocidos. Estos cálculos son parte de los análisis geoestadísticos que se llevan a cabo cuando se trabaja con datos geoespaciales.



El siguiente paso, fue extraer la información altitudinal (z) del Modelo de Elevación Digital – DEM hacia la información vectorial (delimitación de la laguna) mediante la herramienta “Extract Values to Point” del paquete de herramientas de Spatial Analyst Tools del Software ArcGIS, el resultado final permite estimar el nivel de superficie de agua en la que se encuentra la laguna Palcacocha al momento de la obtención de la imagen por el satélite y esta información servirá como un medio de alerta ante un posible desbordamiento de esta laguna que afectaría a la ciudad de Huaraz - Ancash.

La validación de esta metodología se efectuó comparando los resultados del estudio realizado por la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA en base a un trabajo de “Batimetría de la Laguna Palcacocha realizado en febrero del 2016”, el cual indica que el nivel de agua de la Laguna era de 4562.88 msnm, cabe señalar que esta información fue proporcionada por la Agencia Espacial del Perú – CONIDA y también esta publicada en el repositorio del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego con el identificador URI <https://hdl.handle.net/20.500.12543/518>.

La finalidad de esta metodología está orientada a la reducción de costos de operación por técnicas tradicionales (trabajo de campo) en la zona de estudio.



1.2 Planteamiento del Problema

Debido a su ubicación apostada al pie de dos grandes nevados: Palcaraju y Pucaranra, en la cabecera de la quebrada Cojup, en el Parque Nacional Huascarán, la Laguna Palcacocha actualmente posee características que incrementan el peligro por un posible desembalse de sus aguas que afectaría a la ciudad de Huaraz, poniendo en riesgo a 50,000 personas y potenciales daños de nivel estructural, por lo que es necesario realizar un monitoreo satelital del nivel de la superficie de la laguna que a su vez esté integrada a un sistema de alerta temprana, con el propósito de que la población pueda evacuar a zonas seguras, entre otras acciones vinculadas a la Gestión Reactiva del Riesgo de Desastres. Debido a esto, se plantea lo siguiente: ¿Se pueden utilizar imágenes satelitales multisensor para estimar el nivel de la superficie de la laguna Palcacocha y de esta manera monitorear el riesgo?

1.3 Justificación

Como resultado de la disminución de los glaciares ocasionado por el cambio climático, se han formado o expandido muchas lagunas en la Cordillera Blanca, las cuales representan varios niveles de peligro de aluvión por desbordamiento de una laguna de origen glaciar para las comunidades ubicadas aguas abajo de estas lagunas. En particular, la laguna Palcacocha, situada por encima de la ciudad de Huaraz, que causó un demoledor aluvión en diciembre de 1941 dejando más de 1500 fallecidos y considerables pérdidas estructurales, cuyo volumen de agua se ha incrementado de manera peligrosa en los últimos años.

Steven A. Wegner. (2014) menciona que “El departamento de Ancash tiene una historia trágica remontada a 1941, cuando la Laguna Palcacocha rompió su dique morrénico y produjo el



mayor aluvión de origen glacial que jamás había pasado por una zona urbana, es muy difícil calcular el número de fallecidos”. (Pp 3).

Por lo expuesto, es fundamental considerar el conjunto de técnicas satelitales como herramientas alternativas que permitan obtener de forma rápida las estimaciones de los niveles de superficie de la laguna, de manera que esta información multitemporal pueda ser empleada como una medida de alerta ante un posible desbordamiento y posterior aluvión que podría afectar a la ciudad de Huaraz. Por ello, el uso de un conjunto de estas tecnologías disponibles, se constituye en una alternativa importante, siendo necesario la determinación de metodologías y el establecimiento de estándares para estos procedimientos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Promover la cooperación científica entre INDECI y CONIDA para generar información geoespacial a partir de imágenes de satélite, que contribuya al monitoreo de lagunas altoandinas de origen glacial.

1.4.2 Objetivo Especifico

- a) Determinar una metodología para el monitoreo multitemporal del nivel de aguas de la laguna Palcacocha en base a imágenes satelitales y un Modelo Digital de Elevación, puesto que se encuentra en un umbral de riesgo que afectaría a la población, infraestructuras y al medio ambiente.
- b) Realizar la validación de los resultados obtenidos en este trabajo cotejando con los resultados obtenidos en campo por la Dirección de Conservación y



Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA en su trabajo de “Batimetría de la Laguna Palcacocha” realizado en febrero del 2016.

1.5 Área del estudio

La Laguna Palcacocha de origen glacial está ubicada al pie de dos grandes nevados: Palcaraju y Pucaranra, en la cabecera de la quebrada Cojup, en el Parque Nacional Huascarán (cordillera Blanca), políticamente pertenece al distrito de Independencia, provincia de Huaraz, departamento de Ancash, en las coordenadas geográficas: 9°23'41'' de Latitud Sur y 77°22'44'' de Longitud Oeste, y coordenadas UTM Zona 18s de 8'960,323 m Norte y 238,634 m. Este.

Esta laguna tiene una forma irregular y alargada, con longitudes de 1589.82 m. de largo por 433.72 m. de ancho, una profundidad máxima de 71.1 metros, una altitud del espejo de agua de 4,562.88 msnm. y un volumen de 17'403,353.24 m³ según el último estudio de batimetría realizado por la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA en febrero del año 2016. La contribución de agua proviene de los deshielos de los nevados que circundan a la laguna y en menor grado de las lluvias estacionarias que usualmente se desarrolla en los meses de diciembre a marzo. Su espejo de agua sigue estando aun en contacto con la lengua glaciar, por lo que se le cataloga como laguna en desarrollo, sus aguas son represadas por dos diques artificiales cuyo drenaje final al río Santa es mediante el río Quillcay, que atraviesa la ciudad de Huaraz de este a oeste.



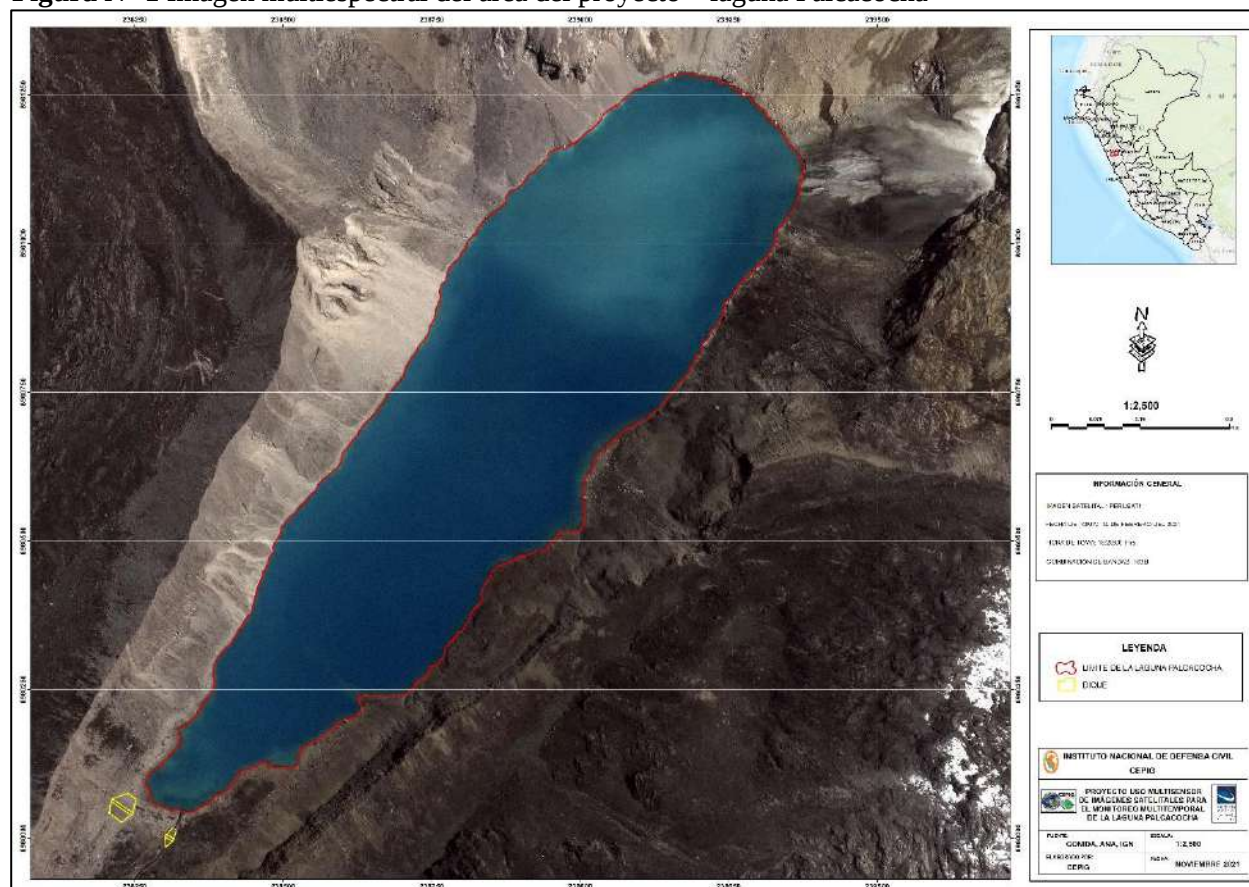
AGENCIA ESPACIAL
DEL PERÚ CONIDA

DIRECCIÓN DE
APLICACIONES Y
GEOMÁTICA - DIAPG

CENTRO DE ESTUDIOS, PROCESAMIENTO DE
INFORMACIÓN E INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN
REACTIVA - CEPIG



Figura N° 1 Imagen multiespectral del área del proyecto – laguna Palcacocha



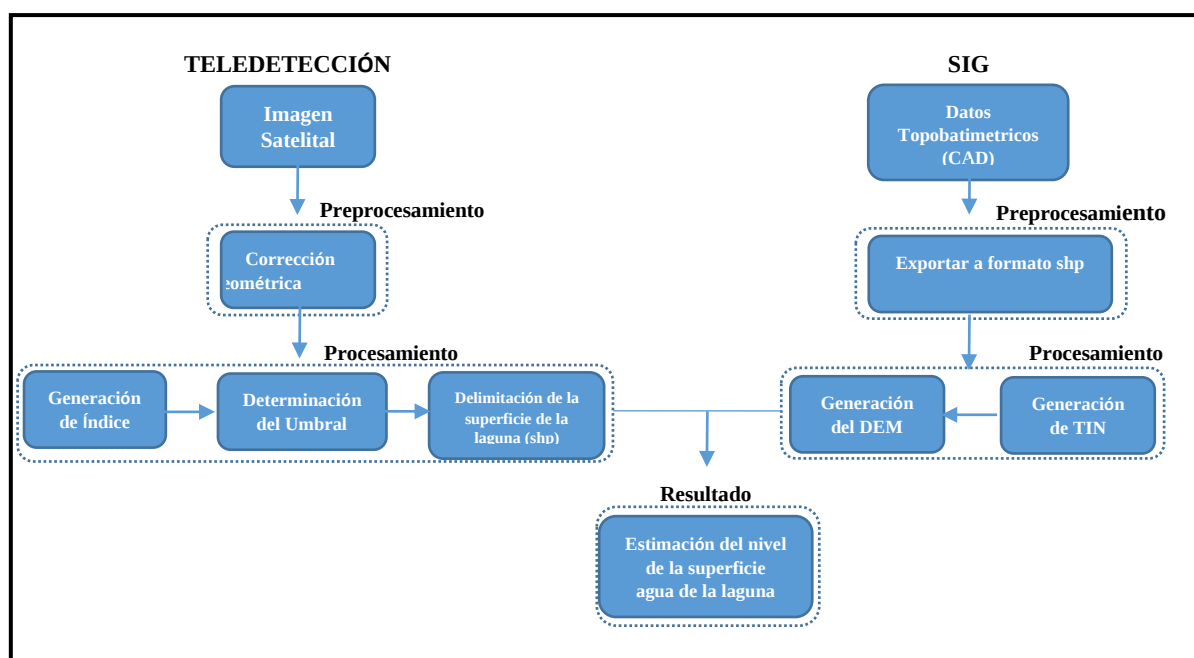
Fuente: Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1 proporcionada por CONIDA



2 Metodología

En la Figura 1 se presenta un diagrama de flujo con las diferentes etapas de la metodología propuesta en este trabajo. En los ítems siguientes se describe cada una de estas etapas.

Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología



Fuente: Elaboración propia.

2.1 Insumos

2.1.1 Imágenes del Satélite Spot 6

Para este proyecto la Agencia Espacial del Perú – CONIDA, proporcionó una imagen multiespectral del satélite Spot 6 de fecha de adquisición abril del 2016, esta información en particular es importante porque los resultados obtenidos de esta imagen permitieron realizar una comparación (validación regresiva) con los resultados obtenidos en el levantamiento topobatemétrico realizado por la Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA en febrero del 2016.



El satélite SPOT 6 fue diseñado y desarrollado por Airbus Defence and Space, lleva operando desde 1986 y garantiza la continuidad de la misión de la serie SPOT.

Estos satélites ópticos de nueva generación incorporan además mejoras tecnológicas y un sistema más eficaz que redundará en una mayor capacidad de adquisición y respuesta, facilitando el acceso a los datos espaciales.

El satélite SPOT 6 fue lanzado el 09 de septiembre 2012, permite la observación de la tierra garantizando la continuidad de los datos en alta resolución y posee una órbita casi polar, circular, helio sincrónica y en fase, se encuentra a 694 km. de altitud.

Tabla N° 1 Características técnicas de la Imagen multiespectral del satélite SPOT6

BANDAS	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	RESOLUCIÓN RADIOMETRICA	RESOLUCIÓN TEMPORAL
Banda Pancromática	1.5 m.	450 - 745 nm	12 Bits	1 Día (con Spot7)
Banda Azul	6 m.	450 - 520 nm	12 Bits	1 Día (con Spot7)
Banda Verde	6 m.	530 - 590 nm	12 Bits	1 Día (con Spot7)
Banda Roja	6 m.	625 - 695 nm	12 Bits	1 Día (con Spot7)
Banda Infrarrojo Cercano	6 m.	760 - 890 nm	12 Bits	1 Día (con Spot7)

Fuente: Airbus Defence and Space (DS).



Figura N° 3 Imagen multiespectral del satélite Spot 6 de fecha de adquisición 28/04/16



Fuente: Imagen proporcionado por CONIDA. 13/05/2021

2.1.2 Imágenes del Satélite Peruano PeruSAT-1

El satélite peruano PeruSAT-1 es un satélite de observación de la Tierra que posee la facultad de capturar imágenes multiespectrales de alta resolución, el cual fue desarrollado por la empresa francesa Airbus Defence and Space (AIRBUS) solicitado por el estado peruano para ser utilizado en aplicaciones militares y civiles dentro del espacio del territorio peruano.

Actualmente, el satélite PeruSAT-1 es operado por la Agencia Espacial del Perú - CONIDA, gestionando y proporcionando imágenes (en sus diferentes niveles de procesamiento) de forma gratuita a todas las entidades del estado para ser utilizados en temas de Planificación



Urbana, Monitoreo de Desastres, Infraestructura Vial, Deforestación, Detección de Cultivos Ilegales y Pistas Clandestinas etc.

La Agencia Espacial del Perú proporcionó una imagen multiespectral de este satélite de fecha de adquisición febrero del 2021 con un nivel de procesamiento que comprende: corrección radiométrica, geométrica, atmosférica y ortorectificada.

Tabla N° 2 Características técnicas de la Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1

BANDAS	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	RESOLUCIÓN RADIOMETRICA	RESOLUCIÓN TEMPORAL
Banda Pancromática	0.7 m.	450 - 750 nm	12 bits	26 días
Banda Azul	2.8 m.	450 - 520 nm	12 bits	26 días
Banda Verde	2.8 m.	530 - 600 nm	12 bits	26 días
Banda Roja	2.8 m.	620- 690 nm	12 bits	26 días
Banda Infrarrojo Cercano	2.8 m.	760 - 890 nm	12 bits	26 días

Fuente: Agencia Espacial del Perú – CONIDA.



Figura N° 4 Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1 de fecha de adquisición 14/02/21



Fuente: Agencia Espacial del Perú – CONIDA. 13/05/2021

2.1.3 Levantamiento Batimétrico y Topográfico

En febrero del año 2016 la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA, a solicitud de la Plataforma de Defensa Civil de la Región Ancash, efectuó un nuevo levantamiento topobatimétrico de la laguna Palcacocha (el anterior fue realizado en setiembre del 2009) al observarse el incremento del volumen de la superficie de agua como consecuencia del contacto de la laguna Palcacocha con la parte posterior de un pequeño glaciar, para lo cual se contó con el apoyo del Gobierno Regional de Ancash y del Ejército Peruano Batallón Juan Joile Palacios, acantonado en la ciudad de Huaraz.



El método empleado para el levantamiento batimétrico, fue el registro continuo; para este fin se empleó la ecosonda graficadora digital GPSMAP 188C SOUND, de la marca GARMIN, cuya información de profundidades, fue comprobada con lecturas de repetición.

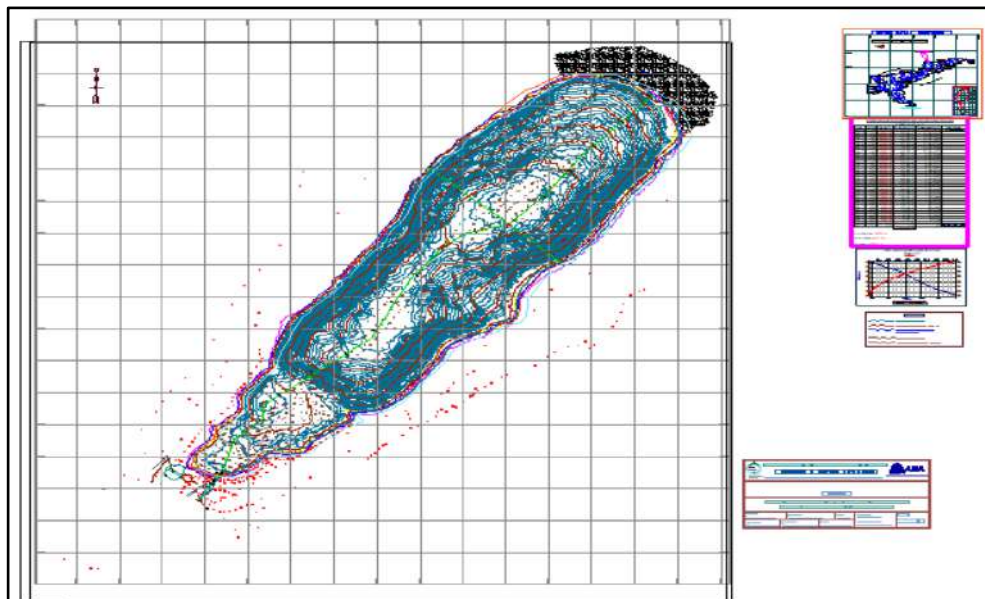
El levantamiento topográfico del perímetro de la laguna se realizó, con la estación total, de la marca TOPCON modelo GPT 7005L, la cual tiene una precisión de ($\pm 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D$). “Batimetría de la Laguna Palcacocha febrero del 2016”.

Los datos del levantamiento topobatimétrico fueron solicitados por la Agencia Espacial del Perú - CONIDA y proporcionada al Centro de Estudios, Procesamiento de Información e Investigación para la Gestión Reactiva – CEPIG – INDECI, en formato DWG (AutoCAD). Cabe señalar que esta información esta publicada en el repositorio del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego con el identificador URI <https://hdl.handle.net/20.500.12543/518>.

Esta información es de vital importancia para este trabajo porque de este levantamiento topobatimétrico se generó un Modelo de Elevación digital - DEM de donde se obtuvo la información altitudinal (valor z) para determinar la elevación del nivel del agua de la laguna Palcacocha.



Figura N° 5 Información de los datos Topobatimétrico del Área del Proyecto



Fuente: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA

2.2 Preprocesamiento (Teledetección)

2.2.1 Corrección Geométrica

La corrección geométrica se realiza con la finalidad de posicionar la imagen en el área adecuada y eliminar las distorsiones en la imagen. La identificación de puntos de control, el manejo de efemérides, DEM o los remuestreos de píxel son algunas de las técnicas empleadas para corregir las imágenes.

Las imágenes proporcionadas por la agencia espacial del Perú – CONIDA (Spot 6 y PeruSAT-1) pasan por un proceso de corrección geométrica utilizando un Modelo de Elevación Digital – DEM universal, para mejorar la posición de las imágenes en el área de estudio se realizó una georreferenciación aprovechando los datos del levantamiento topobatimétrico, en especial de los puntos levantados en campo de una plataforma de concreto (dique) ubicado en la zona sur de la laguna, esto se efectuó con la finalidad de que la imágenes de los satélites Spot 6 y Perusat1 concuerden con los datos tomados en campo y así



asegurar que el resultado de la información se adapte a la realidad, este proceso se realizó con el software ArcGIS.

Figura N° 6 Imagen multiespectral del satélite Spot6 sin Georeferenciación



Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 7 Imagen multiespectral del satélite Spot6 Georreferenciada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 8 Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1 sin Georreferenciación



Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 9 Imagen multiespectral del satélite PeruSAT-1 Georreferenciada



Fuente: Elaboración propia.

2.3 Procesamiento (Teledetección)

2.3.1 Generación del índice para la delimitación de la superficie de Agua

La metodología que se aplicó para la delimitación de la superficie de agua de la laguna Palcacocha fue utilizar el Índice Diferencial de Agua Normalizado – NDWI propuesto por McFeeters, (1996), el cual manifiesta que “El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) es un método desarrollado para delinear características de agua abierta y realzar su presencia en imágenes digitales de teledetección. El NDWI hace uso de la radiación infrarroja cercana reflejada y de la luz verde visible para realzar la presencia de tales rasgos, al tiempo que elimina la presencia de rasgos del suelo y de la vegetación terrestre”. El autor señala que este índice espectral es adecuado para maximizar la reflectancia típica de las características del agua utilizando las longitudes de onda de la luz verde y minimizando la baja reflectancia del NIR en los elementos de



agua con el propósito de realzar la presencia de tales atributos, al tiempo que elimina la presencia de rasgos de suelo y de la vegetación terrestre.

Esto método es muy utilizado en Teledetección y los SIG para identificar y delimitar masas de agua abiertos de grandes dimensiones como lagunas, ríos, canales hasta masas de agua pequeñas, tales como turberas, bofedales, ecosistemas acuáticos etc.

McFeeters, (1996) señala que “Los valores del Índice Diferencial de Agua Normalizado – NDWI, fluctúan en un rango de -1 a 1, donde los valores negativos están asociados a regiones sin presencia de vegetación o agua, y los valores positivos están asociados a la presencia de vegetación y agua, cuanto el valor este más próximo a 1 mayor será el contenido de agua”.

La fórmula para el cálculo del NDWI es la siguiente:

$$NDWI: \frac{\text{banda verde} - \text{banda NIR}}{\text{banda verde} + \text{banda NIR}}$$

Para realizar todo este proceso en las imágenes se empleó el software Envi 5.3 utilizando la herramienta Band Math (matemática de bandas) cuya fórmula matemática para realizar el Índice NDWI fue el siguiente:

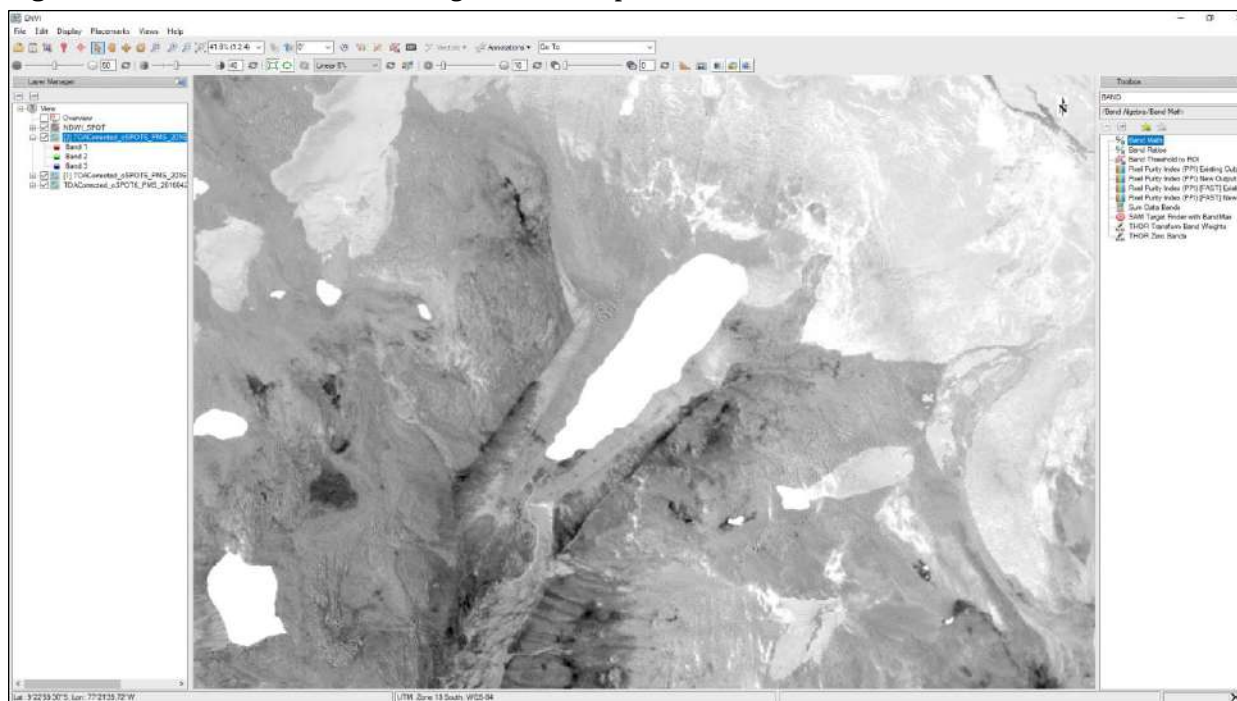
$$\text{float}(B2) - (B4) / \text{float}(B2) + (B4)$$

siendo:

- B2 = Banda verde y
- B4 = Banda NIR

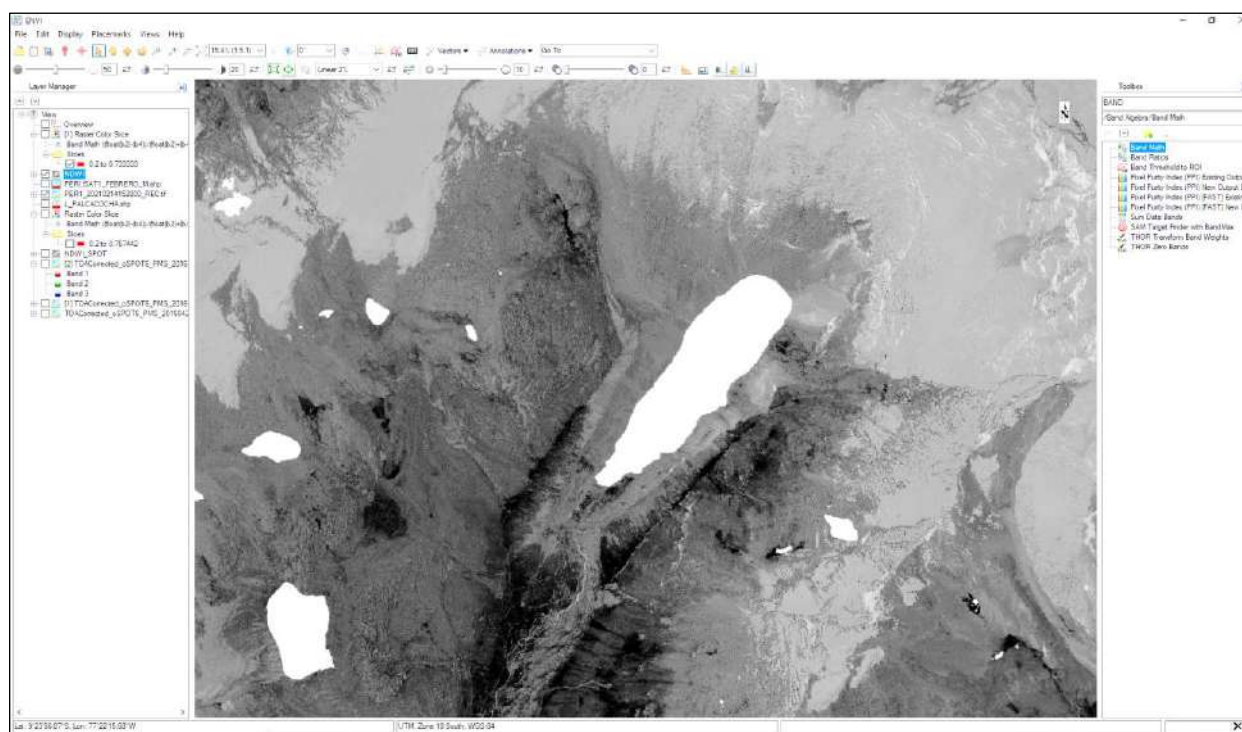


Figura N° 10 Índice NDWI en la imagen satelital Spot 6



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 11 Índice NDWI en la imagen Satelital PeruSAT-1



Fuente: Elaboración propia.

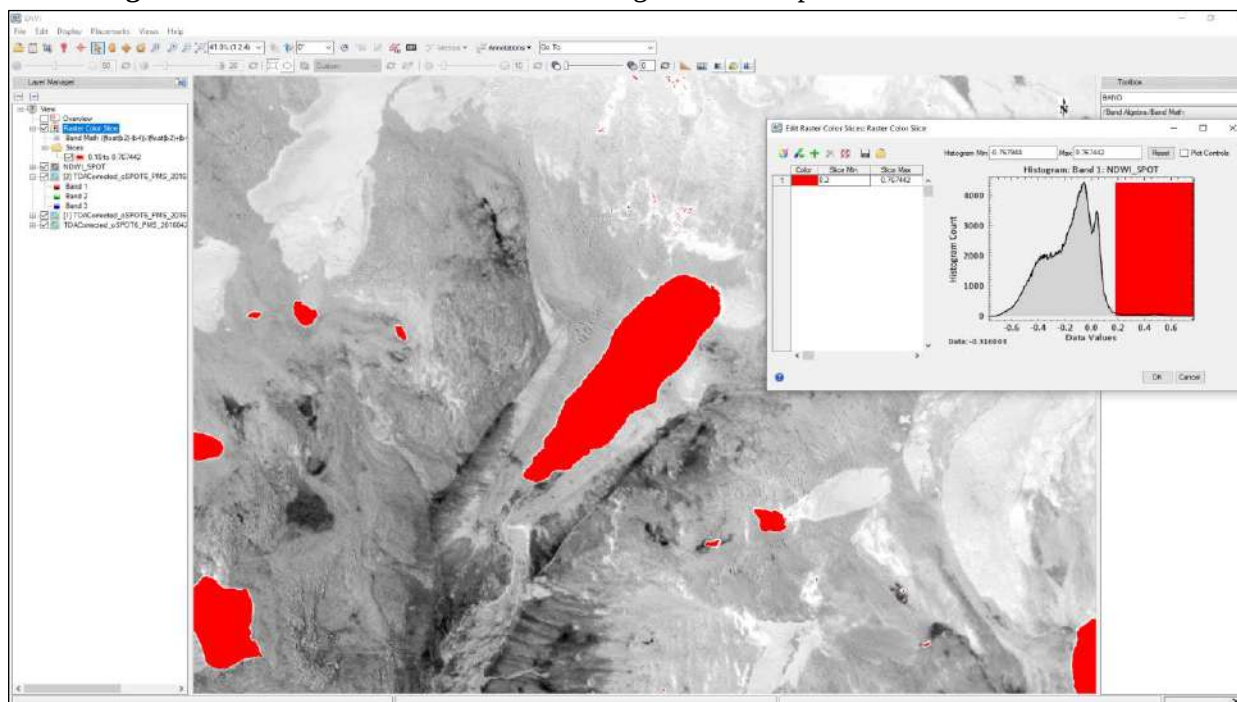


2.3.2 Determinación del Umbral

Para la delimitación de la superficie de agua de la laguna Palcacocha utilizando el índice multispectral NDWI se utilizó un umbral de 0.2 a 0.76 en las imágenes Spot 6 y de un umbral de 0.2 a 0.73 en imágenes Perusat1, este rango se generó en base a una interpretación visual del especialista. Para este paso se utiliza la herramienta “*density slice*” del software Envi 5.3, en vista a que la página de <https://www.l3harrisgeospatial.com> manifiesta que “esta herramienta utiliza y selecciona rangos de datos y colores para resaltar áreas en una imagen de escala de grises”.

Es importante señalar que la variación en la utilización de los umbrales tiene relación con la profundidad y la presencia de materia orgánica en suspensión presentes en los cuerpos de agua.

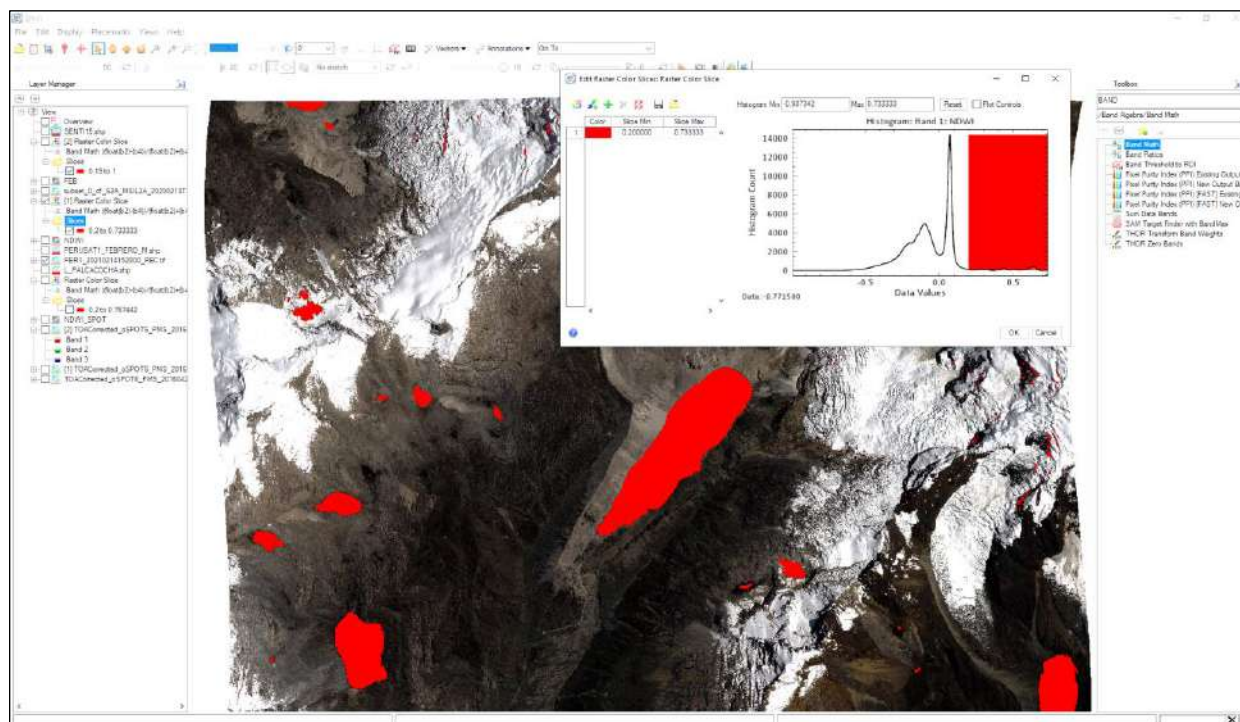
Figura N° 12 Umbral de 0.2 a 0.76 en la Imagen satelital Spot 6



Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 13 Umbral de 0.2 a 0.73 en la Imagen satelital PeruSAT-1



Fuente: Elaboración propia.

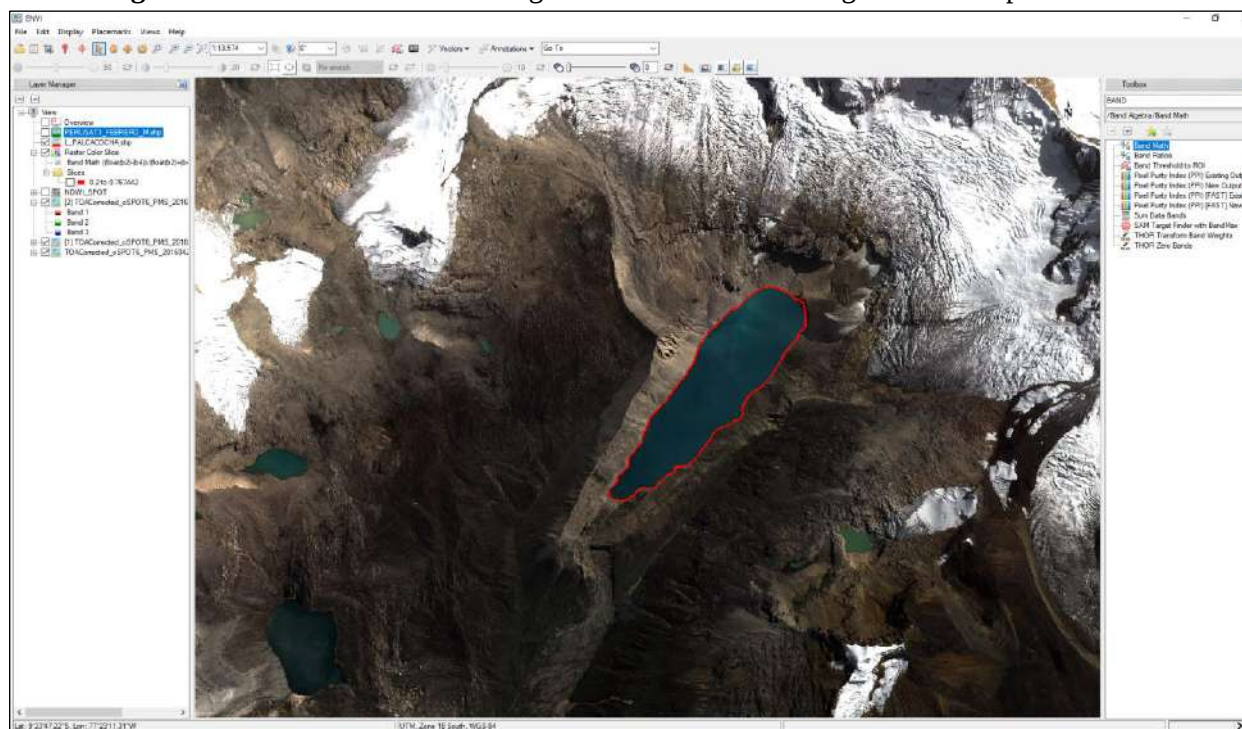
2.3.3 Delimitación de la superficie de la laguna Palcacocha

Una vez determinado el umbral (rangos), se realizó la delimitación de la laguna para cada imagen, este procedimiento se efectuó exportando el umbral determinando de formato ráster a formato shp utilizando el Software Envi 5.3. es importante señalar que los umbrales son diferentes para cada imagen, dependiendo del tipo y superficie que se desea caracterizar.

Los valores de los umbrales utilizados en las imágenes PeruSAT-1 y Spot 6 para delimitar el área del proyecto (laguna Palcacocha) oscilaron entre 0.2 a 0.73 y 0.2 a 0.76 respectivamente.

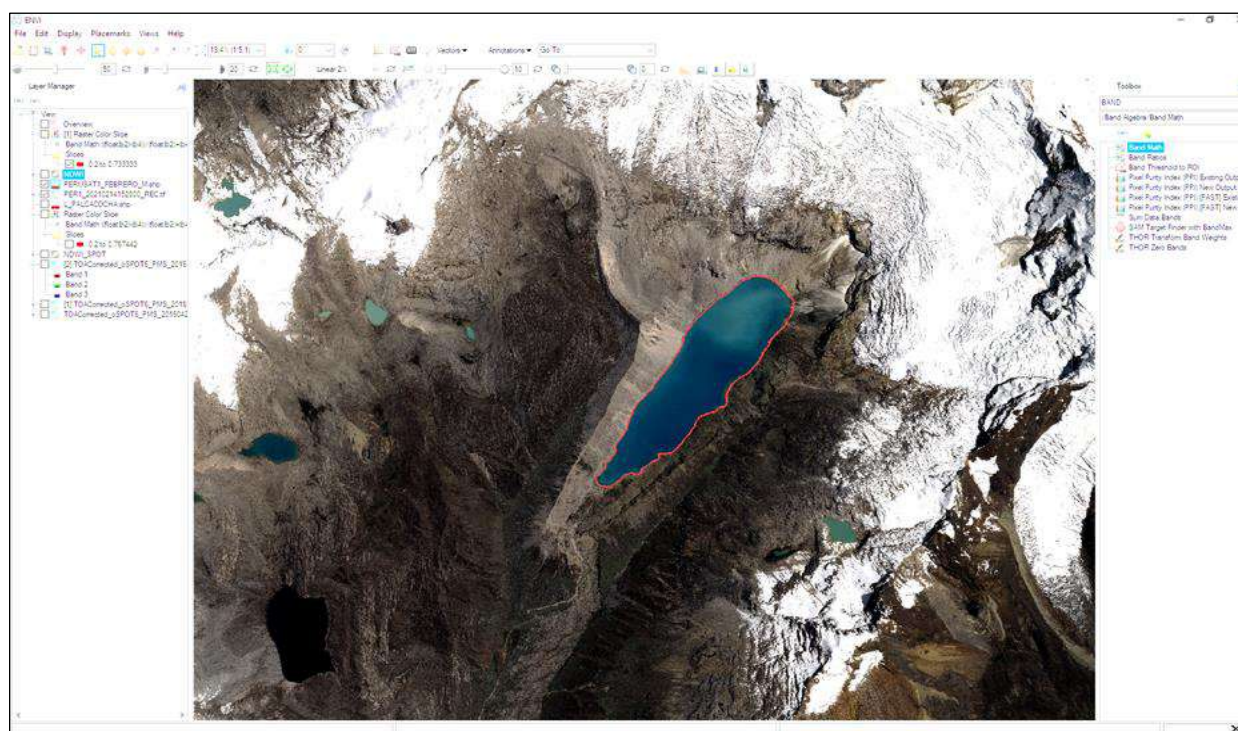


Figura N° 14 Delimitación de la Laguna Palcacocha en la Imagen satelital Spot 6



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 15 Delimitación de la Laguna Palcacocha en la Imagen satelital PeruSAT-1



Fuente: Elaboración propia.



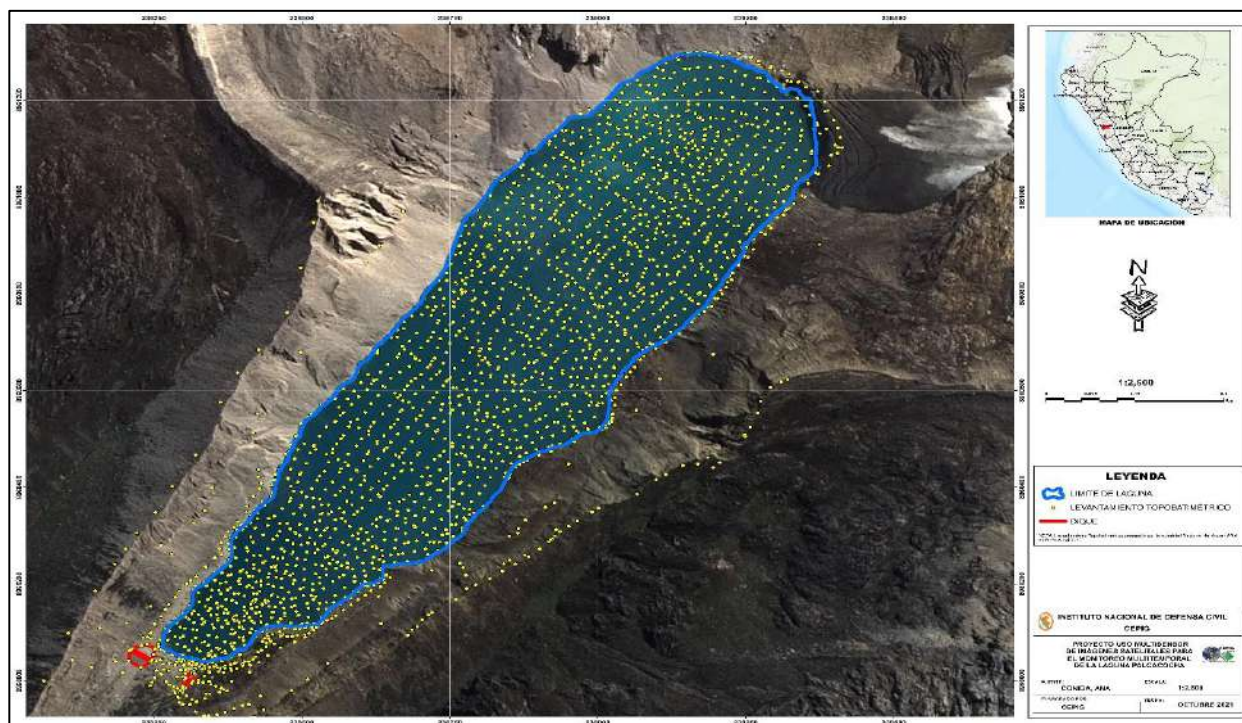
2.4 Preprocesamiento (SIG)

2.4.1 Exportando a formato shp

Los datos del levantamiento topobatimétrico fueron generados en campo y procesados en gabinete por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA, esta información fue solicitada por la Agencia Espacial del Perú - CONIDA y proporcionada al Centro de Estudios, Procesamiento de Información e Investigación para la Gestión Reactiva – CEPIG – INDECI, en formato DWG (AutoCAD).

Toda la información comprende un total 2487 puntos (levantamiento topobatimétrico) y cada punto contiene las coordenadas (x, y) y la información altitudinal (z), para ser utilizados en este proyecto fueron exportados a formato shapefile (shp). Este proceso se realizó utilizando el software ArcGIS.

Figura N° 16 Datos Topobatimétrico exportados a formato shp



Fuente: Elaboración propia.



2.5 Procesamiento (SIG)

2.5.1 Generación de la Malla de Triángulos Irregulares - TIN

Para la generación del Malla de Triángulos Irregulares - TIN a partir de los datos Topobatimétricos de la zona de estudio y efectuar el modelamiento se utilizó el software ArcGIS, el cual permite realizar la unificación de la información de cada uno de los puntos generando un TIN, los cuales realizan una interpolación espacial de las áreas sin información (gaps), se utilizó este método de interpolación por ser el más utilizado en este tipo de análisis.

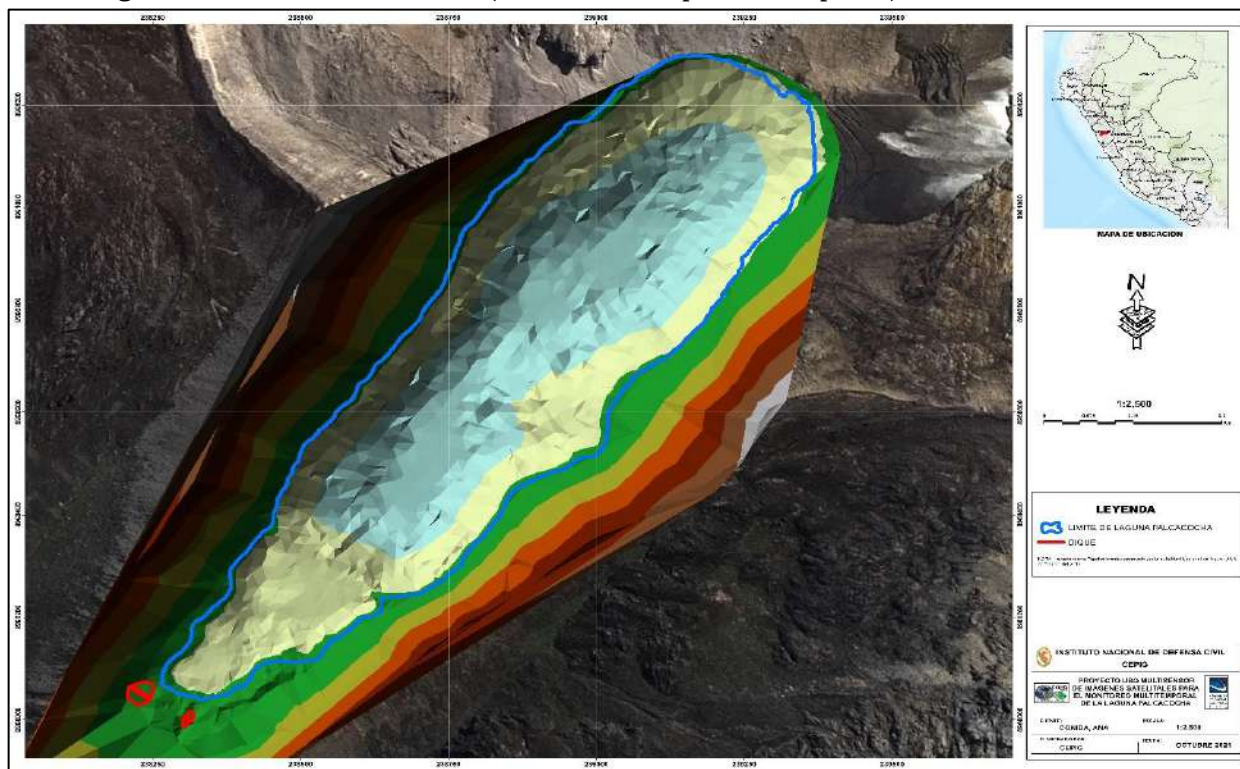
Es importante señalar que la información o insumo (puntos topobatimétricos) presenta una distribución regular y densa dentro del área de estudio (± 6 m. de separación entre puntos), esto influirá en la exactitud del Modelo de Elevación Digital (información más realista).

Los autores Cristian A. Arias Bedoya, Keyvi M. Grisales García, Juan M. Muriel Acosta, Juan R. Valencia Álzate (S.f) señalan que “el algoritmo de Red Triángulos Irregulares (TIN) es el mejor método para la generación de Modelos de Elevación Digital - DEM”. Pp 12

Otros autores como A.L. Montealegre, M.T. Lamelas, J. de la Riva (2014) afirman “que la resolución espacial del ráster y la complejidad morfológica del terreno, afectan a la capacidad de los interpoladores para generar MDE's precisos. En este sentido se puede concluir que el método TIN a ráster es el más preciso en términos generales y además cuenta con la ventaja de que no tiene parámetros ajustables complejos.” Pp 7.



Figura N°17 Generación de TIN (método de Interpolación Espacial)



Fuente: Elaboración propia.

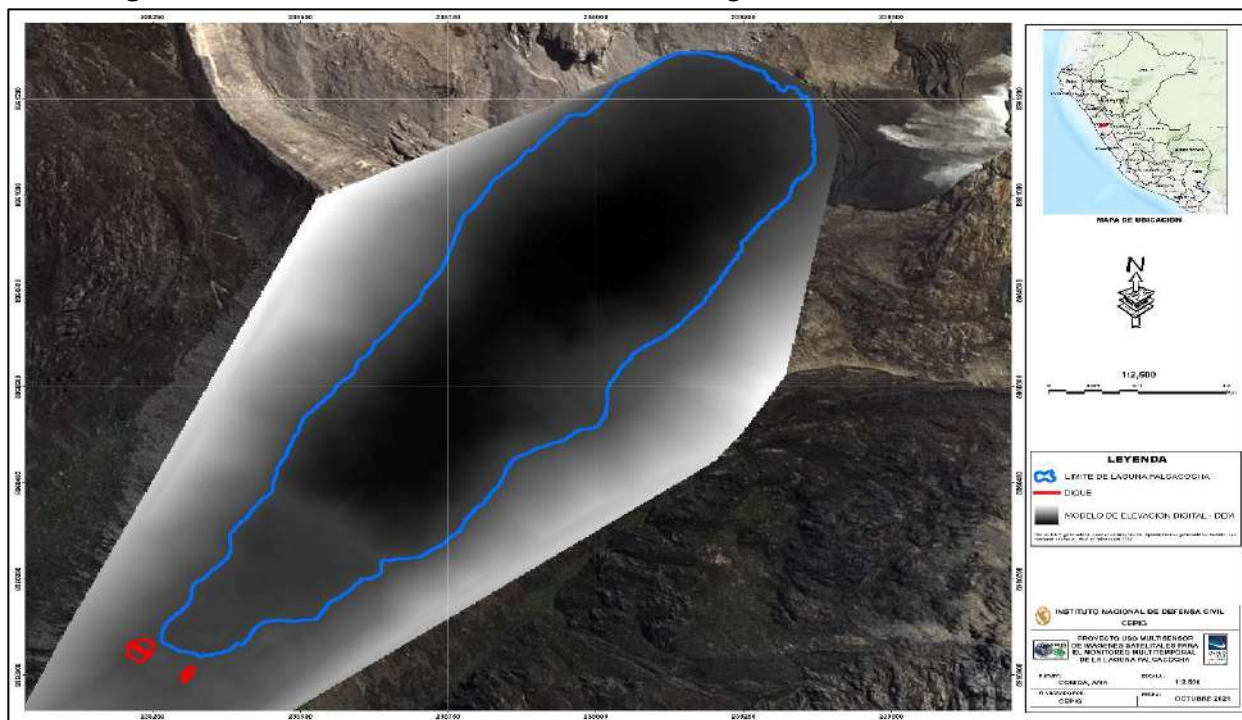
2.5.2 Generación del Modelo de elevación Digital - DEM

Los DEM's constituyen una herramienta fundamental sobre todo en estudios para describir rasgos topográficos. La información altitudinal (z) característica esencial que conforma un DEM es obtenida a través de sistemas pasivos o activos, o bien por mediciones directas como es el caso de la presente investigación.

Para la generación del Modelo Digital de Elevación – DEM se activó la extensión Geostatistical Analyst y el paquete de herramientas 3D Analyst Tools del software ArcGIS el cual ofrece mayor celeridad en el procesamiento de la información. Cabe señalar que el tamaño del pixel de salida del modelo fue de 5 m. esto debido a que la separación entre los puntos tomados en campo (levantamiento Topobatimétrico) tienen una separación de +- 6 m.



Figura N°18 Generación de Modelo de Elevación Digital – DEM



Fuente: Elaboración propia.

2.6 Estimación del nivel de la superficie de agua de la laguna Palcacocha

Después de haber obtenido la delimitación de la superficie de la laguna en formato raster, se procedió a exportar esta información como un archivo vectorial (2d) de formato *.SHP, (este proceso se realizó con el software Envi 5.3 para ser utilizado por los Sistemas de Información Geográfica – SIG).

Los Sistemas de Información Geográfica – SIG son herramientas indispensables hoy en día porque permiten desarrollar análisis basados en la Geoestadística. F.J. Moral García, (2004), señala que “El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) y la aplicación de la geoestadística ha supuesto un nuevo impulso al análisis de la distribución espacial aplicada a la ecología y a las ciencias ambientales. Un SIG es un conjunto de programas informáticos que sirven



para captar, almacenar, recuperar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos espaciales” Pp1, otro autor como Juan Pablo Celemín, (2020) expresa que “El crecimiento de las tecnologías ha conducido a una masiva divulgación de métodos espaciales y a una mayor valoración de la disciplina geográfica. Es en los SIG donde, en muchos aspectos, los datos espaciales encuentran relevancia social a partir de investigaciones que son consideradas en la política y en la toma de decisiones” Pp 8. Estos autores manifiestan que los SIG permiten a los usuarios recopilar datos como materia prima para analizar, transformar y caracterizar todo tipo de modelos de distribución espacial con el propósito de discernir mejor que acción es más conveniente ejecutar.

Para este proceso se utilizó el software ArcGIS por su versatilidad y capacidad de procesamiento de información vectorial y ráster.

Dentro del paquete de herramientas de Spatial Analyst Tools del software ArcGIS existe una herramienta Extrac Value to Point (extraer valores a un punto) que permitirá la extracción de los valores de elevación (z) de un Modelo de Elevación Digital – DEM hacia un dato vectorial (puntos), para este caso la delimitación de la laguna generada como polígono será convertida a un dato vectorial de puntos con el propósito de realizar la extracción de los valores (elevación) del pixel de la imagen de referencia en este caso el DEM.

Esta herramienta trabaja con dos opciones de interpolación: Vecino más Próximo e Interpolación Bilineal. Según la página de soporte de ESRI <https://support.esri.com/es/technical-article/000005606> señala “el método de Vecino más próximo es más adecuado para datos de categorías como la clasificación de uso del suelo o la clasificación de pendientes. Los valores que se introducen en la cuadrícula no se modifican, el valor de la celda de salida viene determinado



por el centro de la celda más cercana e Interpolación bilineal usa un promedio ponderado de los centros de las cuatro celdas más cercanas. Esto significa que el valor de salida puede ser diferente al de la entrada más cercana, pero siempre está dentro del mismo rango de valores que la entrada”, para la presente investigación nuestro caso se utilizó la opción predeterminada (vecino más próximo) debido a que se requiere que los datos vectoriales (puntos) conserven la información de altitud (z) del centro del pixel más cercano con el propósito de estimar el nivel del agua de la laguna.



3 Resultado

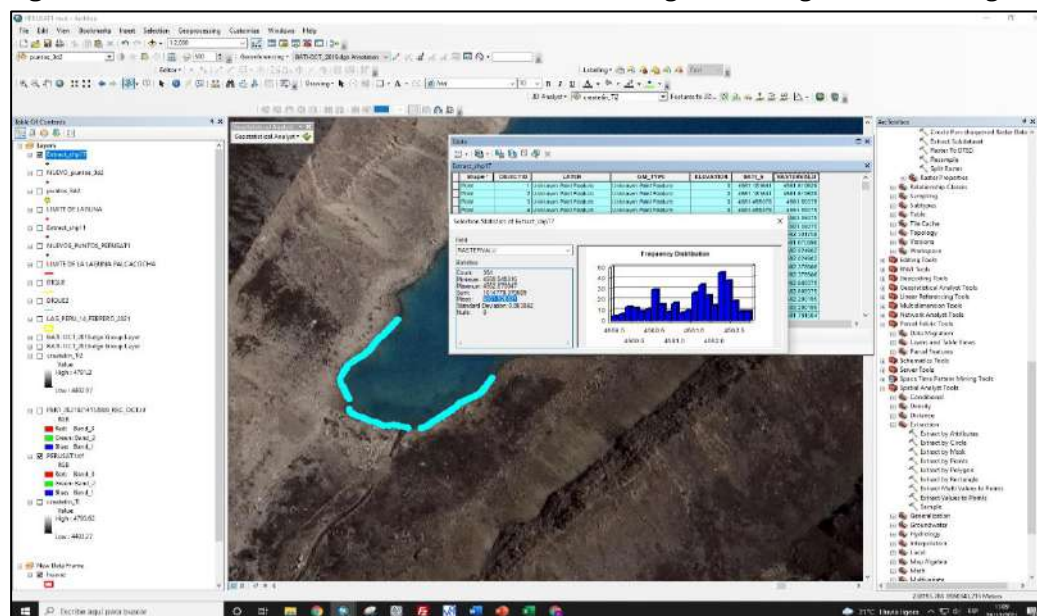
Aplicando la metodología se obtuvo los valores altitudinales (z) para cada punto (límite de la laguna) con el propósito de estimar la altitud a la que se encuentra el nivel del agua de la laguna al momento de la toma de la imagen satelital.

Para la estimación del nivel del agua de la laguna se realizó una selección regional, es decir, solo se tomó en cuenta los puntos que se encuentran en la parte sur del área de trabajo debido a que esa zona es la que conserva una mejor corrección geométrica.

Para cada imagen se tomó en cuenta como resultado final el promedio del valor altitudinal de los puntos escogidos, con esta información se realizó la estimación del nivel de la superficie agua del área de estudio en la que se obtuvo los siguientes resultados:

Para la imagen satelital Perusat1 de fecha de adquisición febrero del 2021, se obtuvo una estimación del nivel de la superficie de agua de la laguna en 4,561.52 msnm.

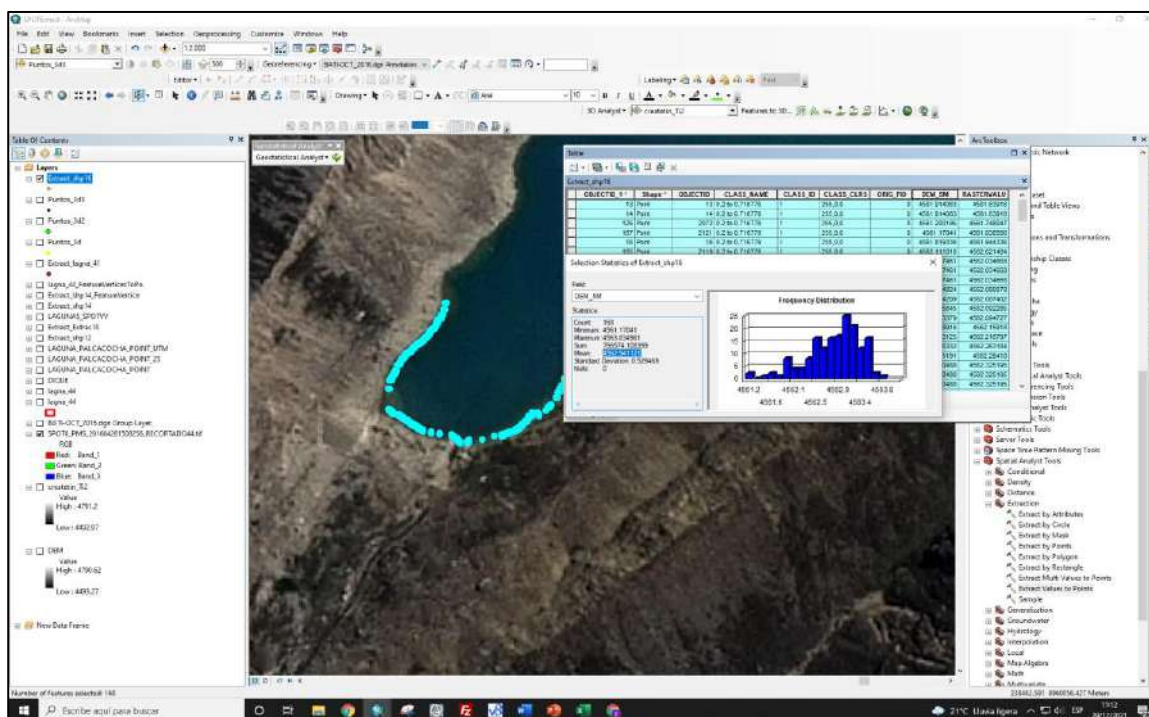
Figura N° 19 Estimación de la Elevación del nivel del agua de la laguna con la imagen PeruSAT-1.



Fuente: Elaboración propia.

Para la imagen satelital Spot 6 de fecha de adquisición abril del 2016 se logró estimar una del nivel del agua de la laguna en 4,562.94 msnm. Aprox. como se muestra en la figura N° 20.

Figura N° 20 Estimación de la Elevación del nivel del agua de la laguna con la imagen Spot 6

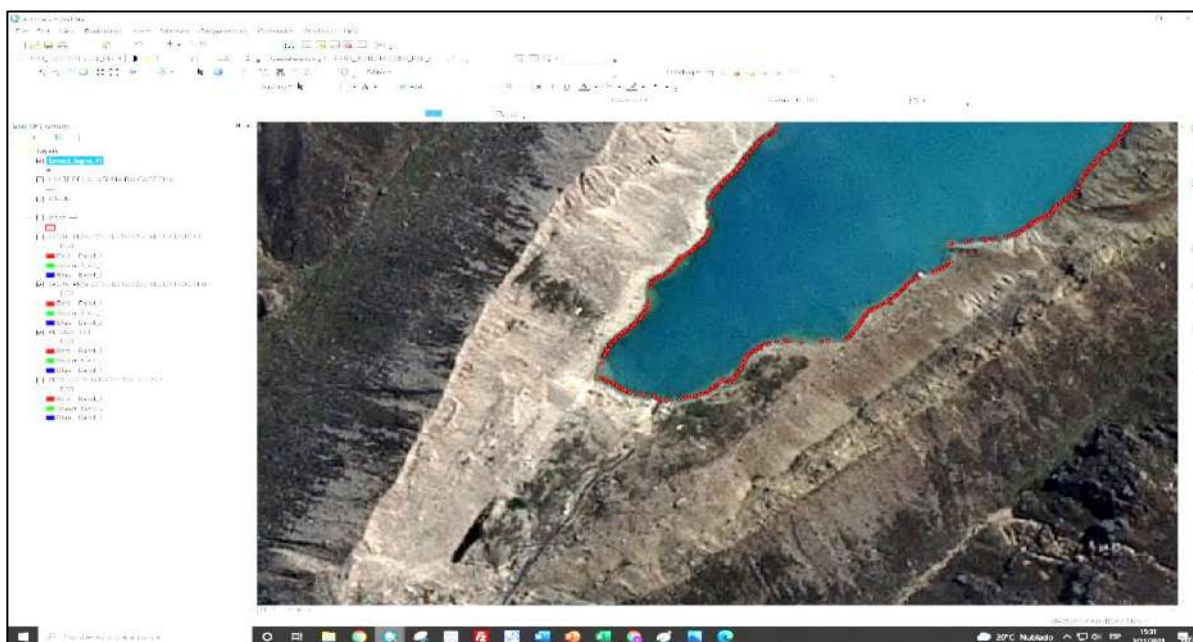


Fuente: Elaboración propia.

Al comparar los resultados obtenidos con la imagen Spot 6 de fecha de adquisición del 2016 y los resultados de la imagen del satélite PeruSAT-1 de fecha de adquisición de febrero del 2021, se obtiene que hay un retroceso del nivel del agua de la laguna en un promedio de metro y medio y esto se aprecia en las siguientes imágenes.

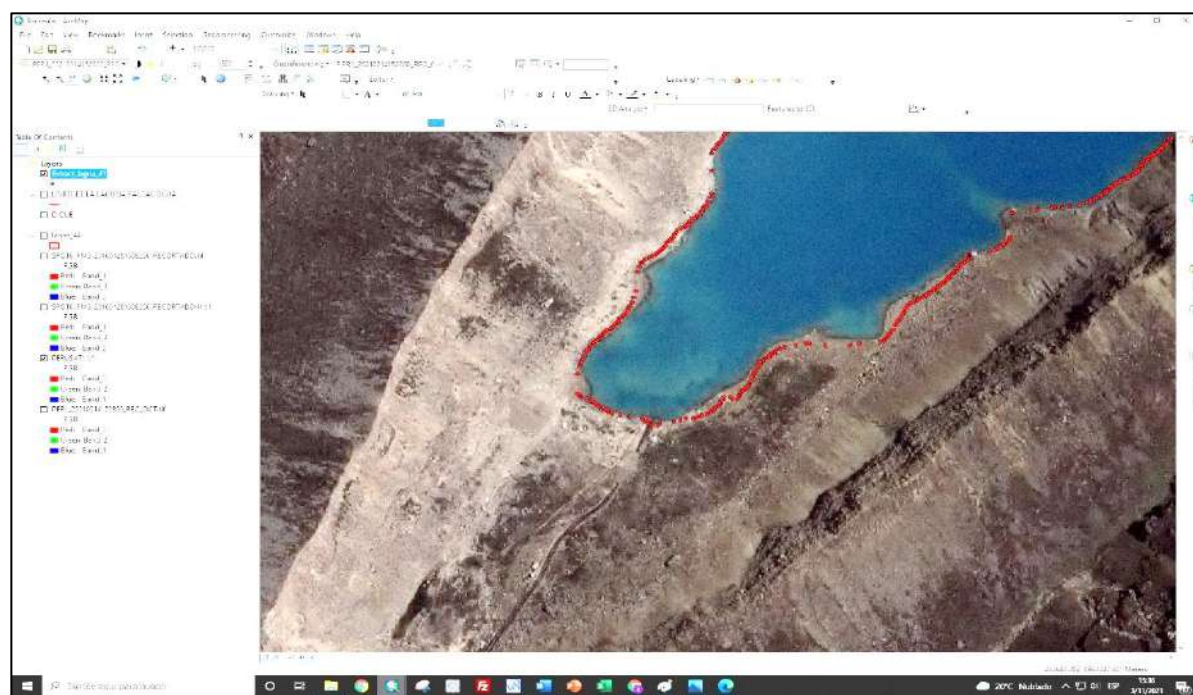


Figura N° 21 Delimitación de la laguna con la imagen Spot 6 de fecha de adquisición abril 2016



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 22 delimitación de la laguna de abril 2016, se le ha superpuesto la imagen PeruSAT-1 de febrero del 2021



Fuente: Elaboración propia.



Efectivamente se percibe en la imagen que hay un retroceso y reducción del nivel de la superficie de agua la laguna Palcacocha que puede ser como consecuencia al buen funcionamiento del sistema de sifonamiento o expulsión de agua por variación de presión instalado por el gobierno regional de Ancash en el año 2011.

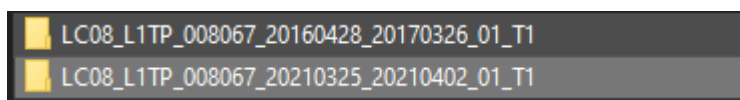
El objetivo principal de este sistema de expulsión de agua es disminuir los riesgos de desastre ante desembalse de la laguna Palcacocha, a través del incremento de la capacidad de evacuación de las aguas de la laguna y de este modo brindar seguridad a la población asentada aguas abajo.



4 Validación

4.1 Validación de la clasificación

Para realizar esta etapa, se empleó el método de validación por Intercomparación, para ello, se utilizaron datos Landsat ya que son datos validados periódicamente por NASA y USGS por tanto ofrecen altos niveles de fiabilidad, se emplearon imágenes de la fecha más próxima a las imágenes de alta resolución usadas para clasificar las lagunas, estas son:



Estas imágenes fueron procesadas siguiendo la metodología indicada anteriormente, luego se emplearon como terreno verdadero o “*ground truth*” en flujos de trabajo para el cálculo de matriz de confusión.

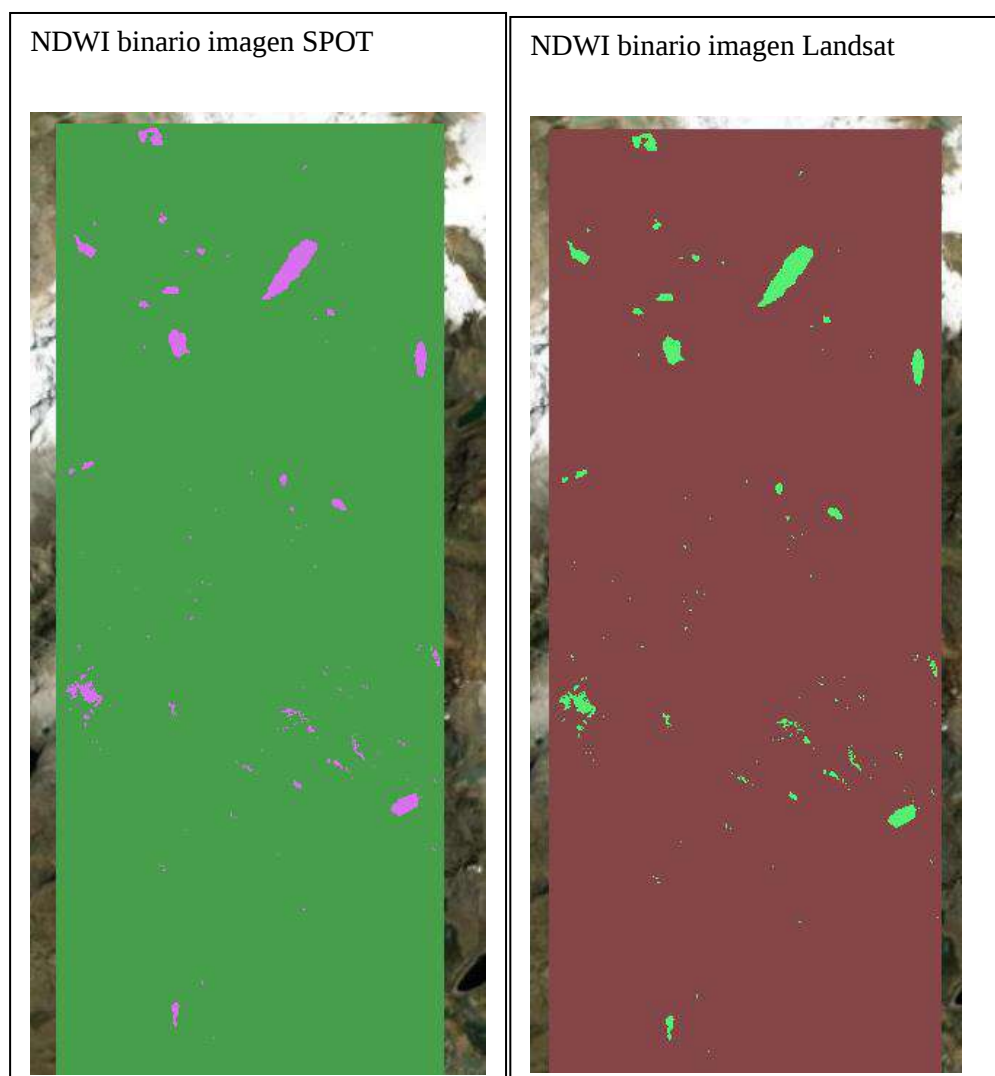
En el caso de la imagen SPOT se obtuvo un coeficiente Kappa de: 0.9 con una precisión total de 99%.

En el caso de la imagen PeruSAT-1 se obtuvo un coeficiente Kappa de: 0.98 con una precisión total de 98%.

Por tanto, la evaluación de precisión realizada nos permite afirmar que más del 90% de los píxeles clasificados como lagunas están correctamente asignados al comparar los resultados con las imágenes Landsat de referencia.



Figura N° 21 Comparación de máscaras de agua





4.2 Validación de la Estimación del Nivel del Agua

La validación de la metodología de la estimación de la superficie del nivel del agua de la laguna se realizó cotejando los datos del levantamiento topobatimétrico generados en campo por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA en el año 2016 el cual determina el nivel de la laguna Palcacocha para esa fecha en 4,562.88 msnm.

El resultado obtenido de la metodología propuesta en este proyecto para determinar el nivel de la superficie de agua de la laguna utilizando una imagen satelital Spot 6 de fecha de adquisición abril del 2016 se estima en 4,562.94 msnm. Se puede apreciar el margen de error en ± 10 cm. con respecto a los datos obtenidos en campo.

Es importante señalar que el levantamiento topobatimétrico generado en campo por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – ANA del año 2016, fue realizado con la finalidad de elaborar una cartografía Topobatimetrico de escala 1:2,000 con un intervalo de curvas de dos metros. Basados en esta información se determinará las precisiones cartográficas para darle mayor sustento al estudio.

Para determinar las precisiones cartográficas con respecto a las tolerancias de los errores en las elevaciones se tomó en cuenta las “Especificaciones Técnicas para la Producción de Cartografía Básica a Escala 1:1,000” generada por el Instituto Geográfico Nacional – IGN ente rector de la cartografía en el Perú, el cual indica que “las elevaciones del 95% de los puntos acotados, no diferirá de la verdadera en más de $\frac{1}{4}$ del valor del intervalo de curva de nivel, el 5% restante nunca excederá del valor del $\frac{1}{2}$ del intervalo de curva de nivel”, si estamos hablando de una escala de 1:2,000 el intervalo de curva será de dos metros eso quiere decir que el $\frac{1}{4}$ del valor



de la curva será de 50 cm y el $\frac{1}{2}$ del valor de la curva será de 1 m. Al final la tolerancia del error en las elevaciones para esta escala estará entre 50 cm a 1 m.

Como se observa, al generar el mapa temático a escala 1:2,000 se cumple con las precisiones cartográficas o errores permisibles de acuerdo a lo especificado en las Especificaciones Técnicas para la Producción de Cartografía Básica a Escala 1:1,000” elaborado por el Instituto Geográfico Nacional-IGN.



5 Conclusiones

- La validación de la metodología se realizó cotejando los resultados obtenidos en esta metodología con los datos del levantamiento topobatimétrico generado en campo por el ANA en febrero del año 2016, el cual determinó que el nivel de la superficie de agua de la laguna Palcacocha para esa fecha en 4,562.88 msnm. El resultado obtenido de la metodología propuesta en este proyecto para estimar el nivel de la superficie de agua de la laguna utilizando una imagen satelital Spot 6 de fecha de adquisición abril del 2016 se estima en 4,562.94 msnm. En tal sentido Se puede apreciar el margen de error en ± 10 cm. con respecto a los datos obtenidos en campo.
- El resultado de la estimación del nivel de superficie de la laguna obtenido utilizando la imagen del satélite Spot 6 de fecha de adquisición de abril del 2016 fue de 4,562.94 msnm y el resultado con la imagen del satélite Perusat1 de fecha de adquisición de febrero del 2021 fue 4,561.52 msnm. evidenciándose que existe un retroceso del nivel del agua de la laguna en un promedio de metro y medio.
- Los valores de los umbrales utilizados en las imágenes PeruSAT-1 y Spot 6 para delimitar el área del proyecto (laguna Palcacocha) oscilaron entre 0.2 a 0.73 y 0.2 a 0.76 respectivamente; es importante señalar que la variación en la utilización de los umbrales tiene relación con la profundidad y la presencia de materia orgánica en suspensión presentes en los cuerpos de agua.
- Los resultados obtenidos en base a las dos imágenes Sport 6 del 2016 y PeruSAT-1 del 2021 indican que el sistema de sifonamiento o expulsión de agua por variación de presión está en funcionamiento, pero esto no es una medida definitiva y se



tendría que buscar una medida estructural definitiva para prevenir un eventual desbordamiento de la laguna.

- El uso de tecnologías espaciales permite el monitoreo del potencial desbordamiento en la zona de estudio orientadas a la toma de decisiones de las instituciones encargadas en la gestión de riesgo de desastres.
- En el resultado final se toma en cuenta que la información puede ajustarse en función al número de puntos evaluados, pues la superficie real siempre tendrá un infinito número de puntos para modelarse con todas sus características morfométricas.

6 Recomendaciones

- Fomentar los mecanismos tecnológicos para el intercambio de información que sea de utilidad y beneficio mutuo entre las instituciones técnico científicas.
- Fortalecer y promover el desarrollo de capacidades de los especialistas mediante la colaboración y cooperación interinstitucional fomentado la participación en cursos y/o talleres relacionados al manejo y procesamiento de imágenes satelitales.
- Realizar el trabajo de campo en la zona de estudio para identificar la variable a ser evaluada en el terreno con el proposito de validar la información obtenida en gabinete
- Dar a conocer a las autoridades competentes y las comunidades asentadas en zonas que podrían ser afectadas ante un posible desbordamiento las diferentes metodologías para la identificación del nivel de agua de las diversas lagunas a nivel



nacional con el objetivo que las entidades gestionen y promuevan oportunamente medidas de gestión prospectivas, correctivas y reactivas del riesgo de desastres.



7 Bibliografía

- Arias, C., Grisales, K., Muriel, J.M., Valencia, J.R. Análisis de la Calidad de Interpolación de tres Algoritmos en un Modelo Digital de Elevaciones Aster Gdem en Base al Error Medio Cuadrático y los Descriptores Topográficos. Academia, 1-13.
- Celemin, J. P. (2020). Cincuenta años de la Primera Ley de Tobler. Geografía y Sistemas de Información Geográfica, 1-18.
- Cochacin, A., Salazar, C. (2016) Batimetría de la Laguna Palcacocha, 1-16
- Esri. (01 de julio de 2021). Pregunta frecuente: ¿cuál es la diferencia entre Vecino más próximo, Interpolación bilineal y Convolución cúbica? Obtenido de <https://support.esri.com/es/technical-article/000005606>
- Instituto Geográfico Nacional – IGN (2011) ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARTOGRAFÍA BÁSICA ESCALA 1:1 000, 1-88
- l3harrisgeospatial (05 de agosto). Overlay Density Slices. Obtenido de <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/OverlayingDensitySliceDisplayGroups.html>
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17: 1425-1432.
- Montealegre, A.L., Lamelas, M.T., de la Riva, J. (2014). Evaluación de Métodos de Interpolación Utilizados en la Creación de modelos Digitales de Elevaciones para la Normalización de la nube de Puntos Lidar-Pnoa en Aplicaciones Forestales. XVI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, 1-7.
- Moral Garcia, F.J. (2004) Aplicación de la Geoestadística en las Ciencias Ambientales. Revista Ecosistemas, 1-9.
- Tobler, W.R. (1970) A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. Economic Geography 46: 234-240.



Wegner, Steven A. (2014) Lo que el Agua se llevo, Consecuencias y Lecciones del Aluvion de Huaraz de 1941, 1-88.



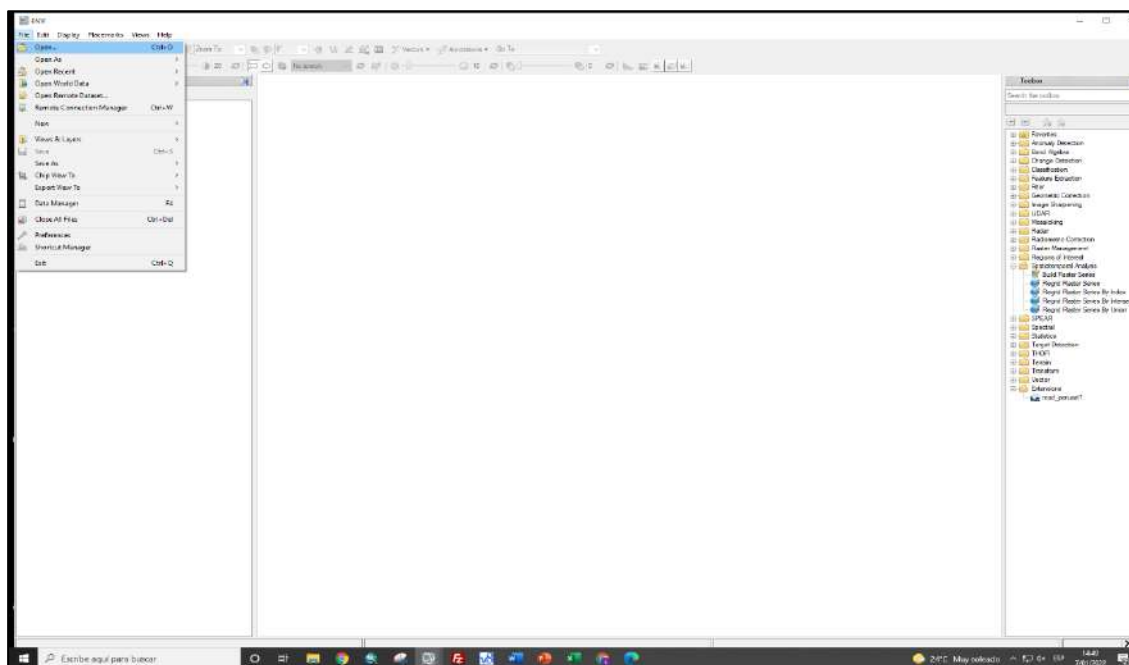
8 Anexos

Manual de Procedimientos para la Estimación del Nivel de Agua de la Laguna Palcacocha utilizando Imágenes Satelitales y un Modelo de Elevacion Digital.

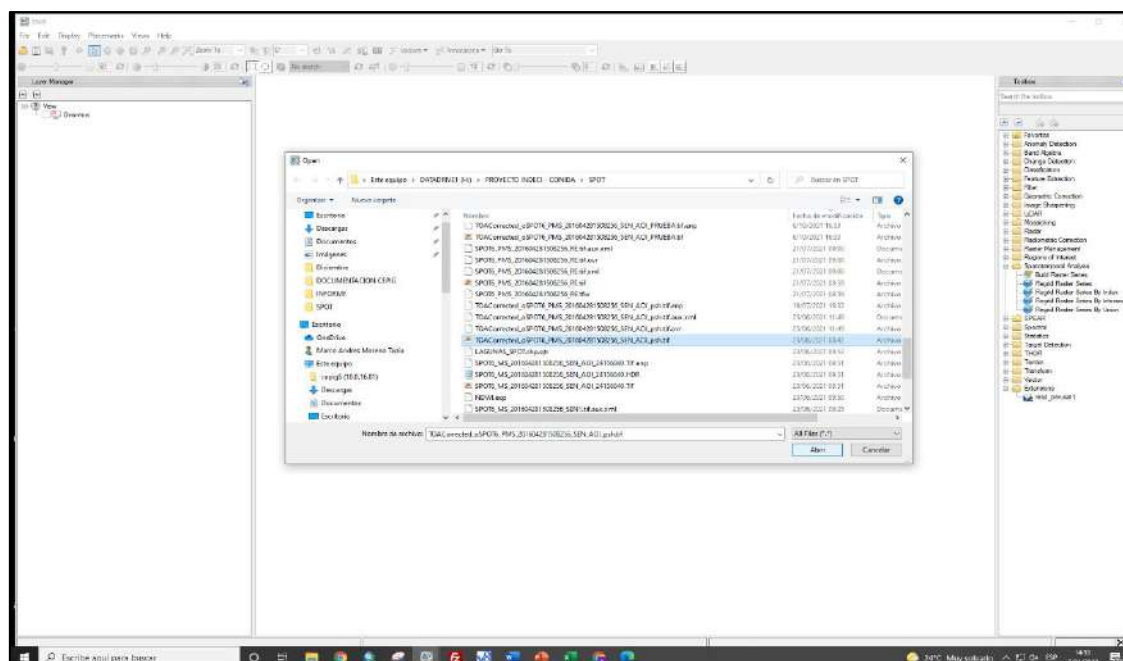
8.1 Iniciar el programa Envi 5.3



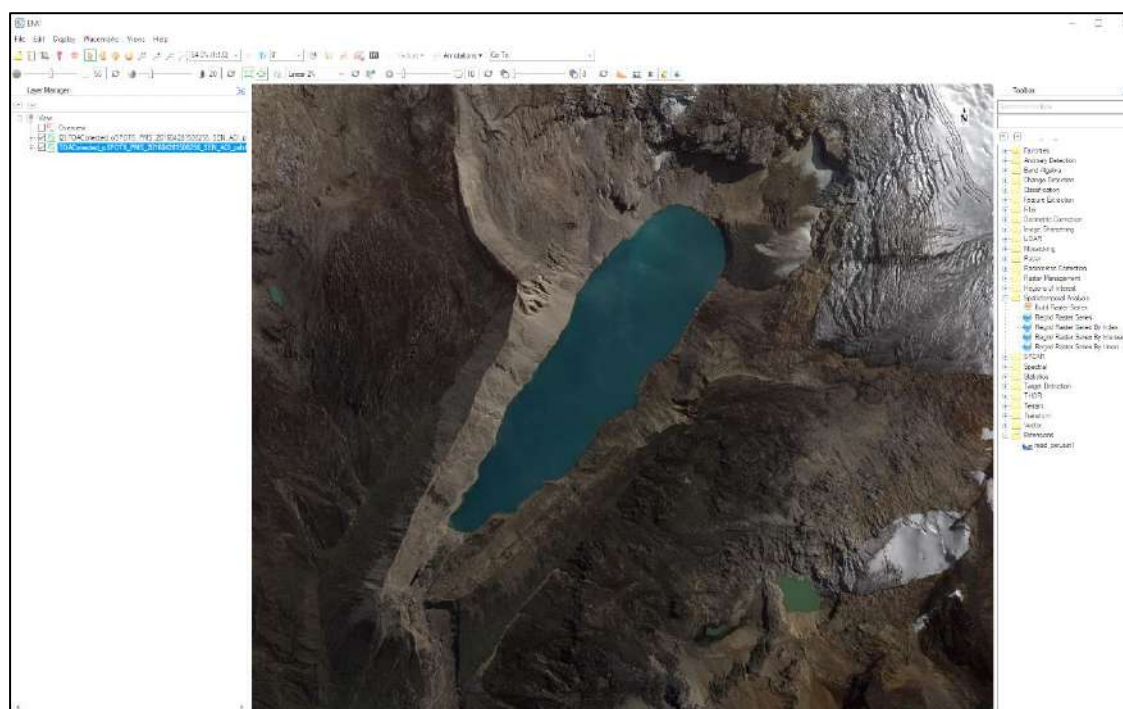
- a) Para agregar las imágenes Satelitales que se utilizaron en este trabajo de investigación se elecciona la opcion “file” del menu principal y la alternativa “open” con la finalidad de elegir la imagen satelital del área de estudio.



- b) Para cargar el archivo se selecciona la imagen que tiene como formato tif y se aplica la opcion “abrir”.



- c) En el área de trabajo del software Envi 5.3 se visualiza la imagen satelital seleccionada con la combinación de bandas B3, B2, B1 (color verdadero)





- d) Para generar el NDWI (Índice Diferencial de Agua Normalizado) se utilizó la herramienta de matemática de bandas (Band Math) que se encuentra en la caja de herramientas principales del software Envi 5.3.

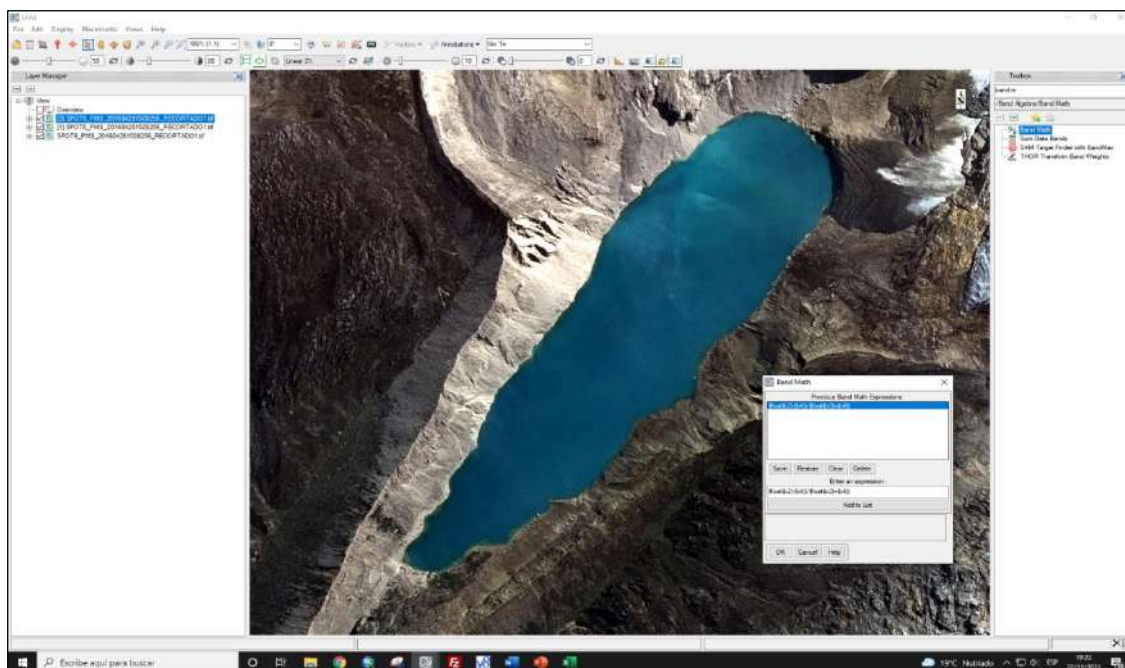
$$NDWI: \frac{\text{banda verde} - \text{banda NIR}}{\text{banda verde} + \text{banda NIR}}$$

La fórmula matemática para realizar el Índice NDWI fue el siguiente:

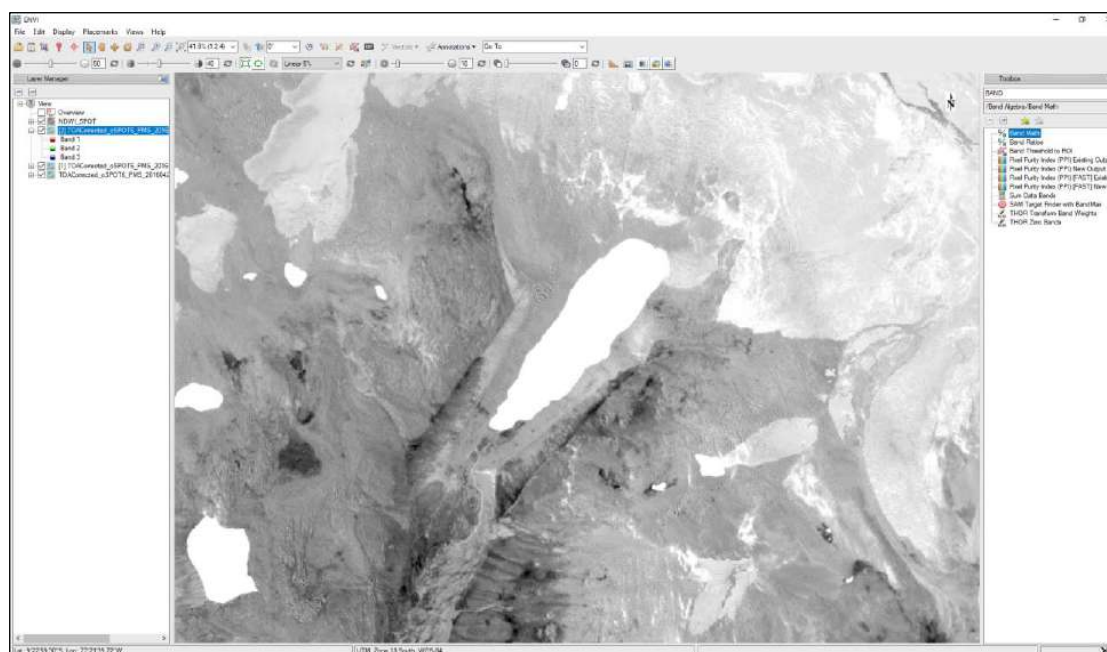
$$\text{float}(B2) - (B4) / \text{float}(B2) + (B4))$$

siendo:

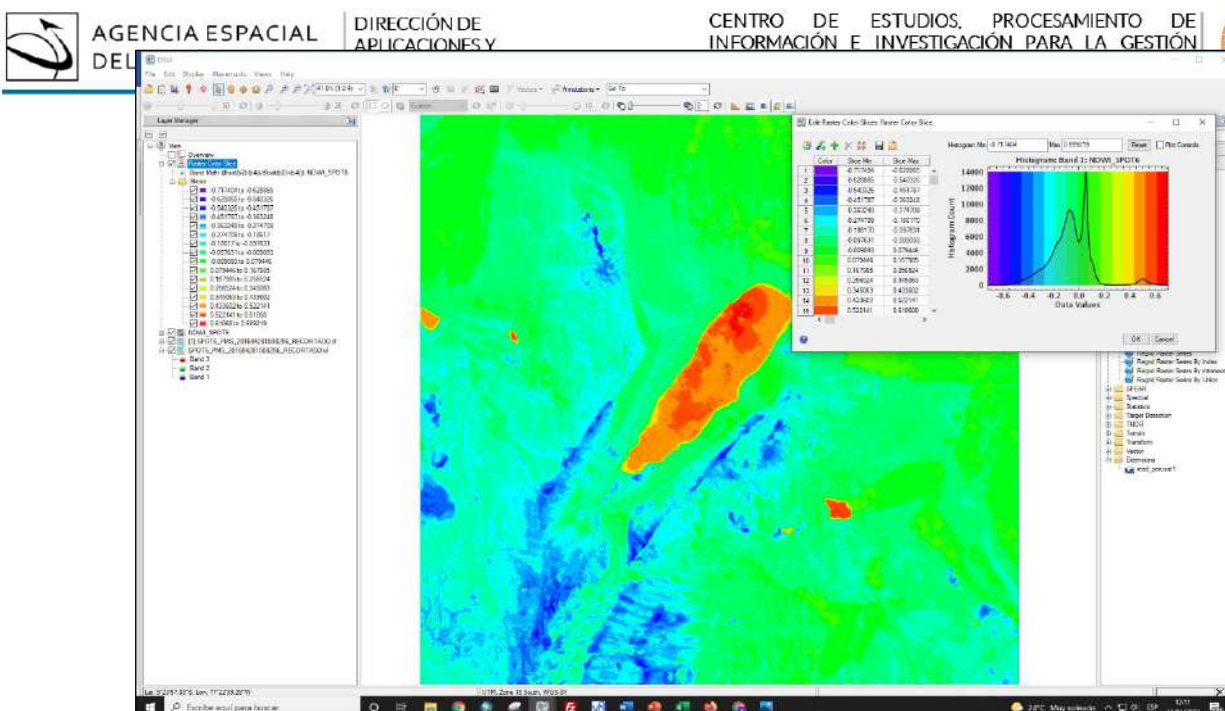
- B2 = Banda Verde y
- B4 = Banda NIR



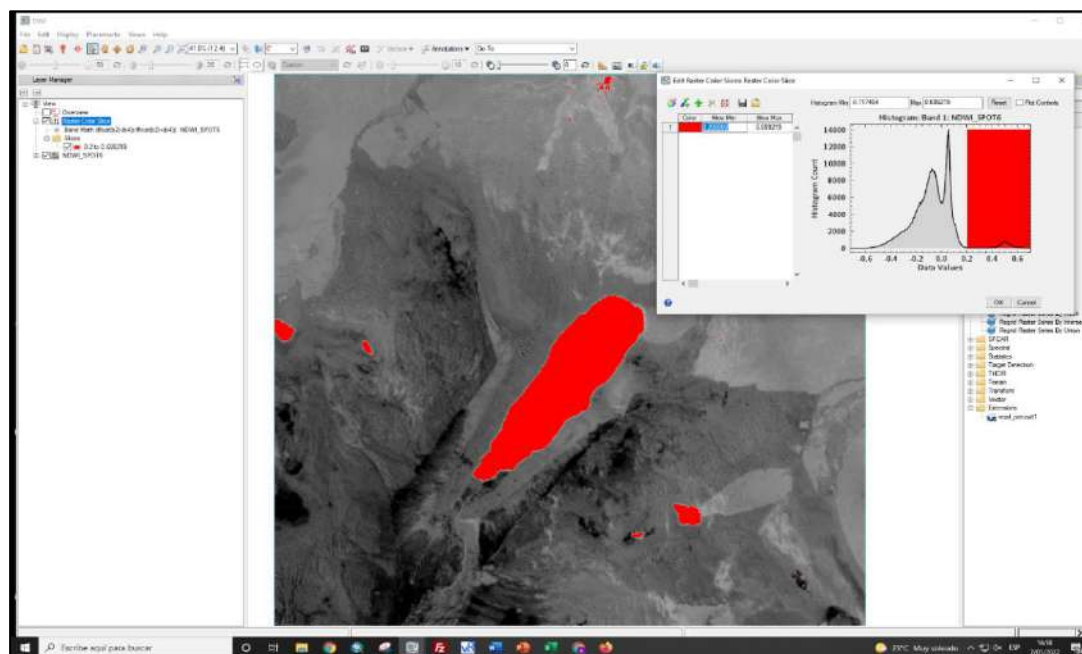
- e) Luego de realizar el proceso se genera una imagen en binaria (blanco y negro) donde los valores positivos indican la presencia de superficies de agua.



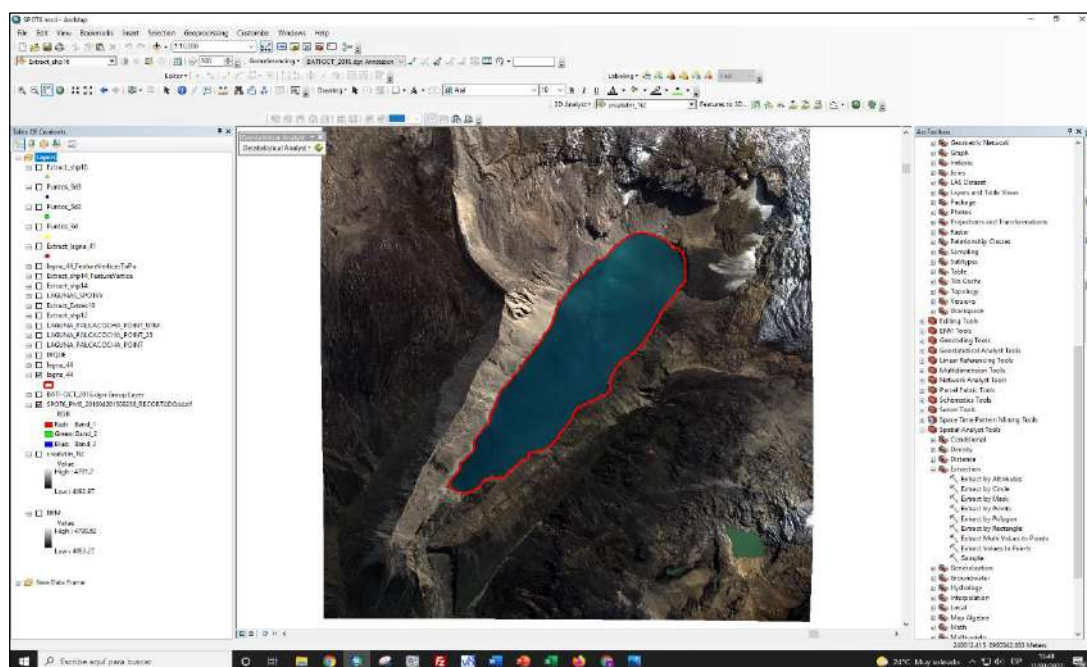
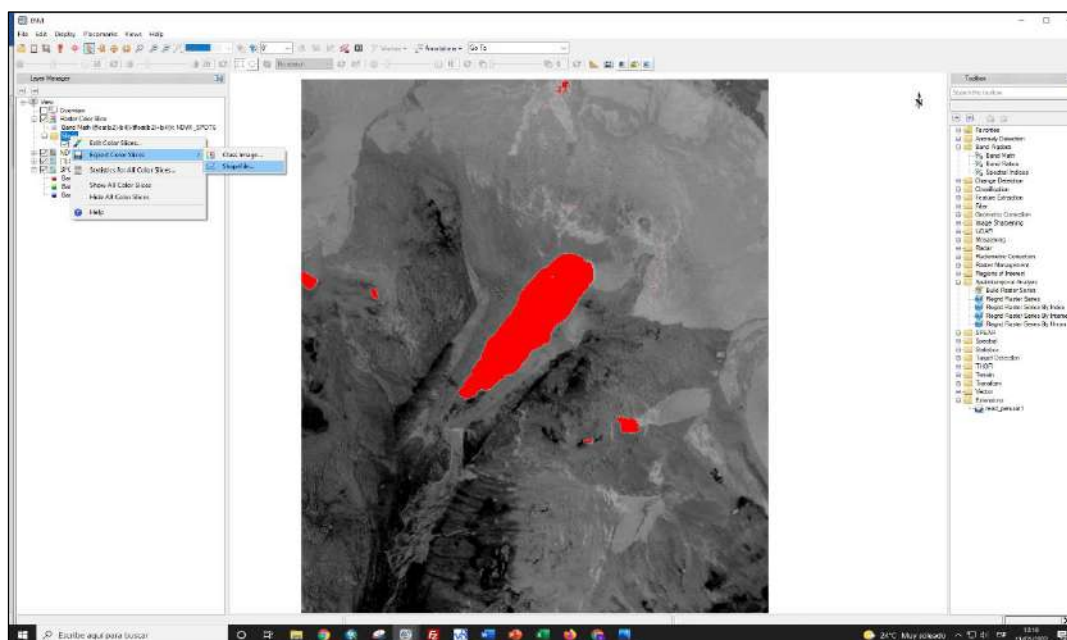
- f) El siguiente paso es utilizar la herramienta Sector de color de Ráster con el objetivo de generar el umbral específico para la delimitación del área de estudio. En el administrador de capas, hacemos clic derecho en el nombre de ráster NDWI generado y le damos clic derecho y elegimos la opción de New Raster Color Slice.



- g) El siguiente proceso es ajustar el rango de valores (umbral) con el proposito de seleccionar el área de estudio



- f) A continuación se procederá a exportar el área seleccionada al formato shp. En el administrador de capas se selecciona el archivo Slice (que contiene el umbral), hacemos clic derecho y se elige la opción de exportar a Color Slice a formato shp.

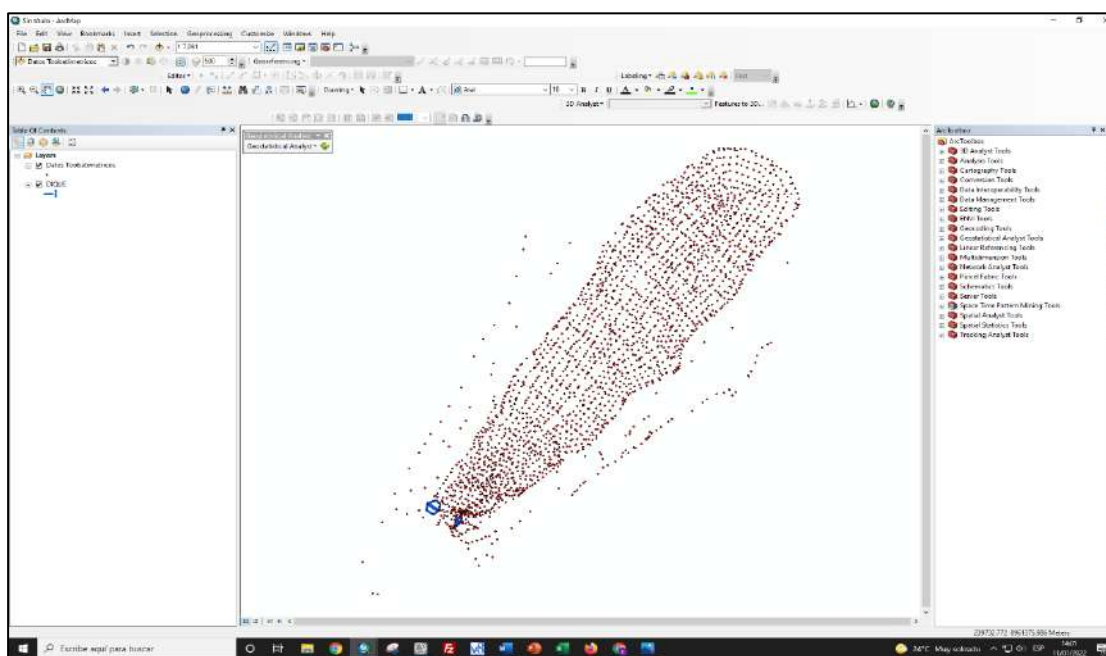
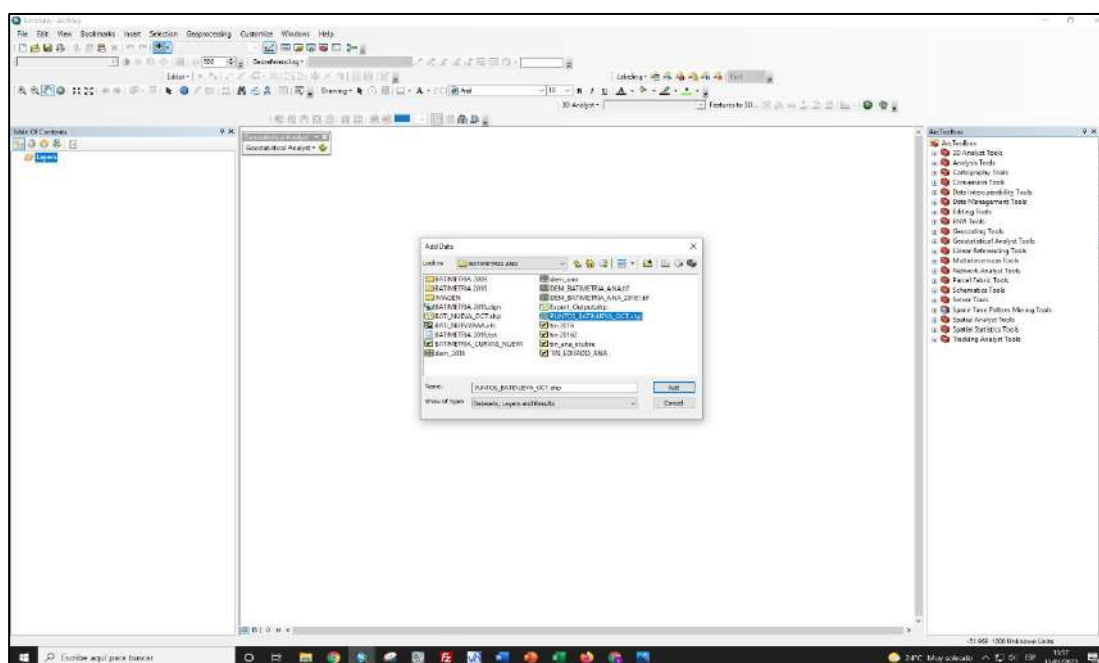


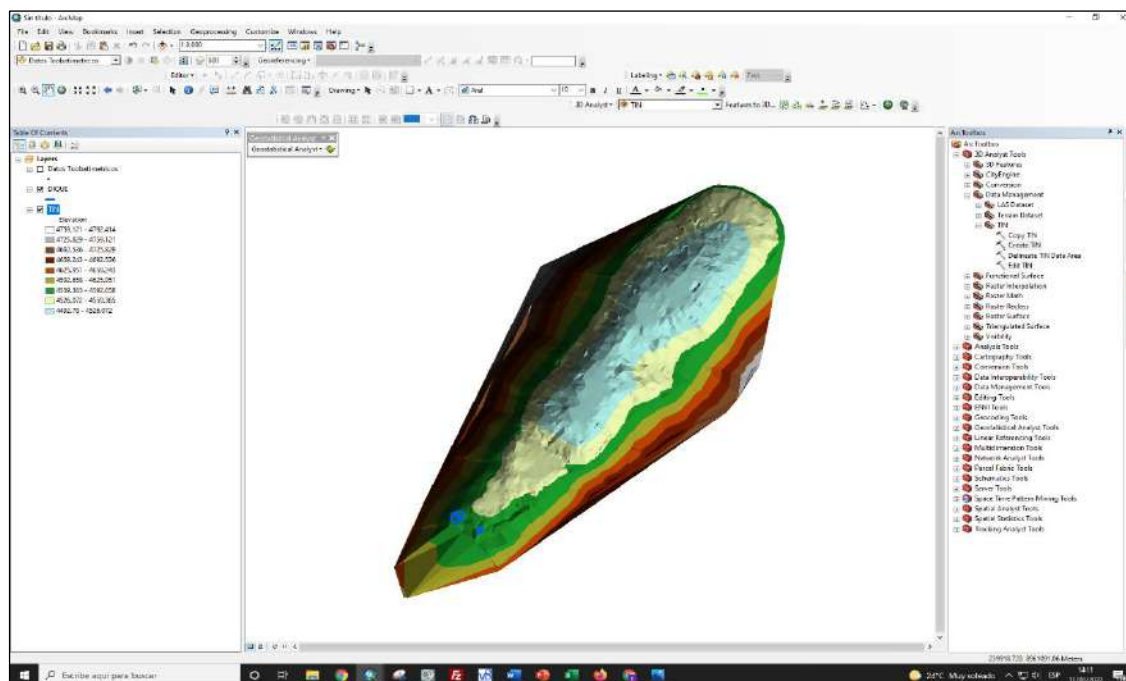
8.2 Generación del DEM

- a) Para este proceso utilizaremos el software ArcGIS 10.4.1. el primer paso para generar el DEM es utilizar la metodología de Interpolación espacial TIN. Se carga el archivo de datos batimétricos utilizando la herramienta Add Data, clic izquierdo

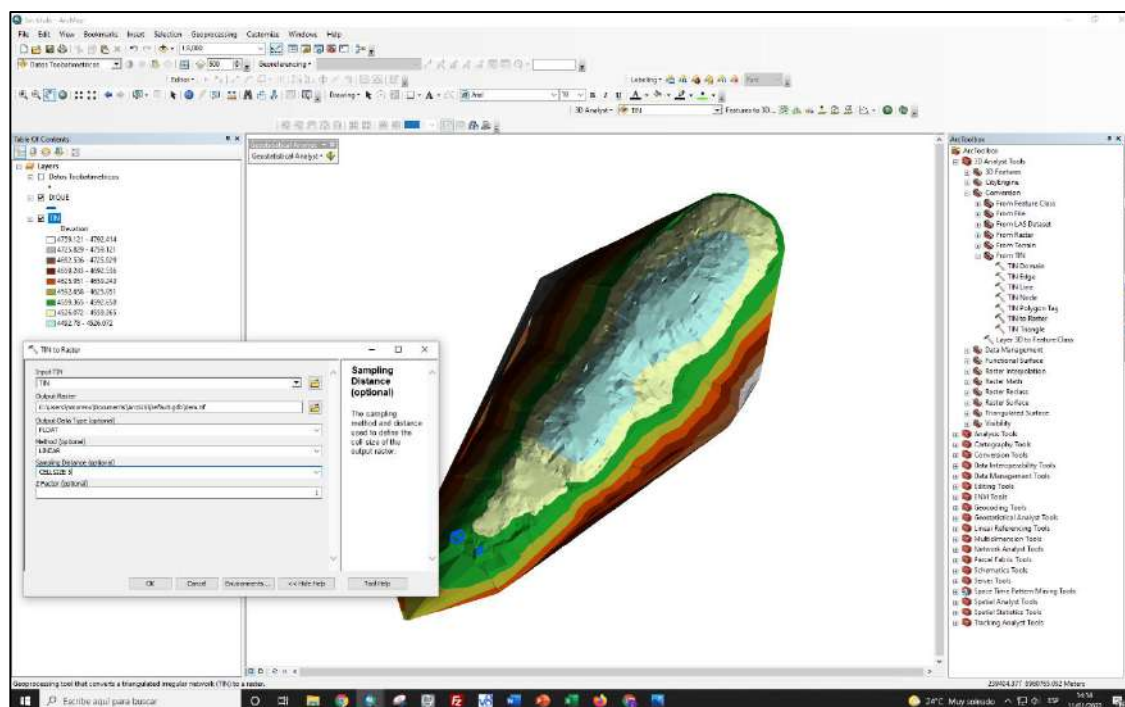


y seleccionamos el archivo que deseamos trabajar. (datos topobatimétricos).



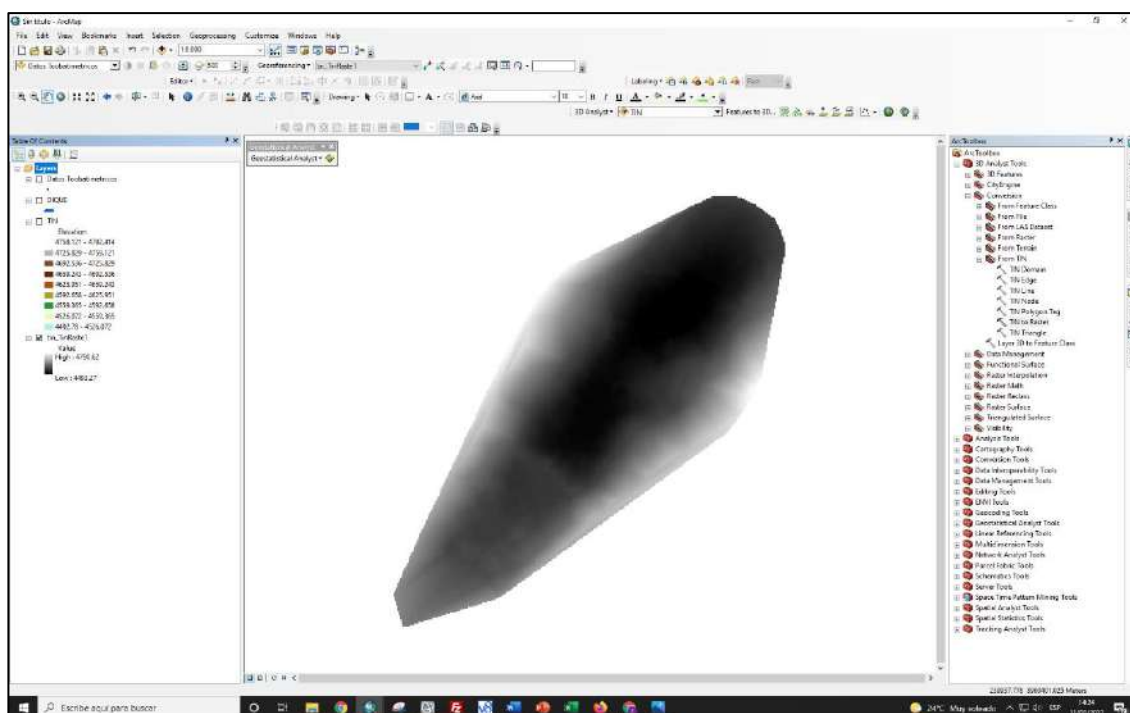


c) El siguiente paso es generar el DEM. Para este proceso se selecciona la herramienta TIN To Raster, que se encuentra ubicado en la caja de herramientas principales. 3D Analyst Tools – Conversion – TIN TO Raster



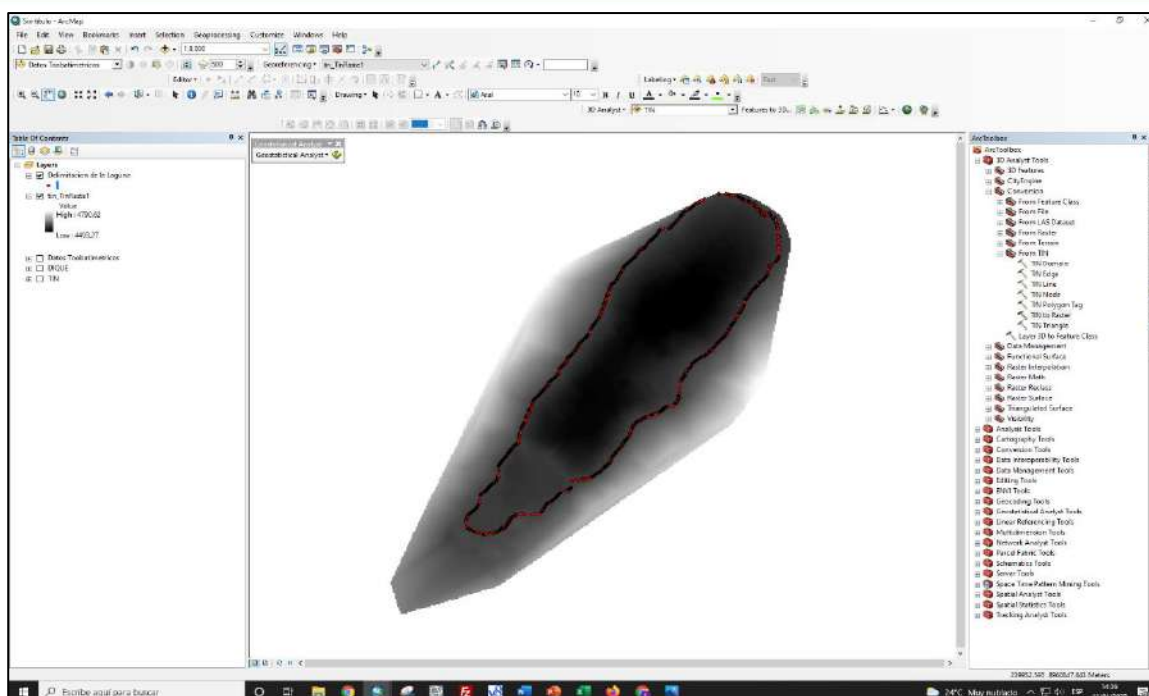


- d) Se elige la carpeta de salida, los datos de entrada será el TIN generado anteriormente y el tamaño del pixel de salida será de 5 m.

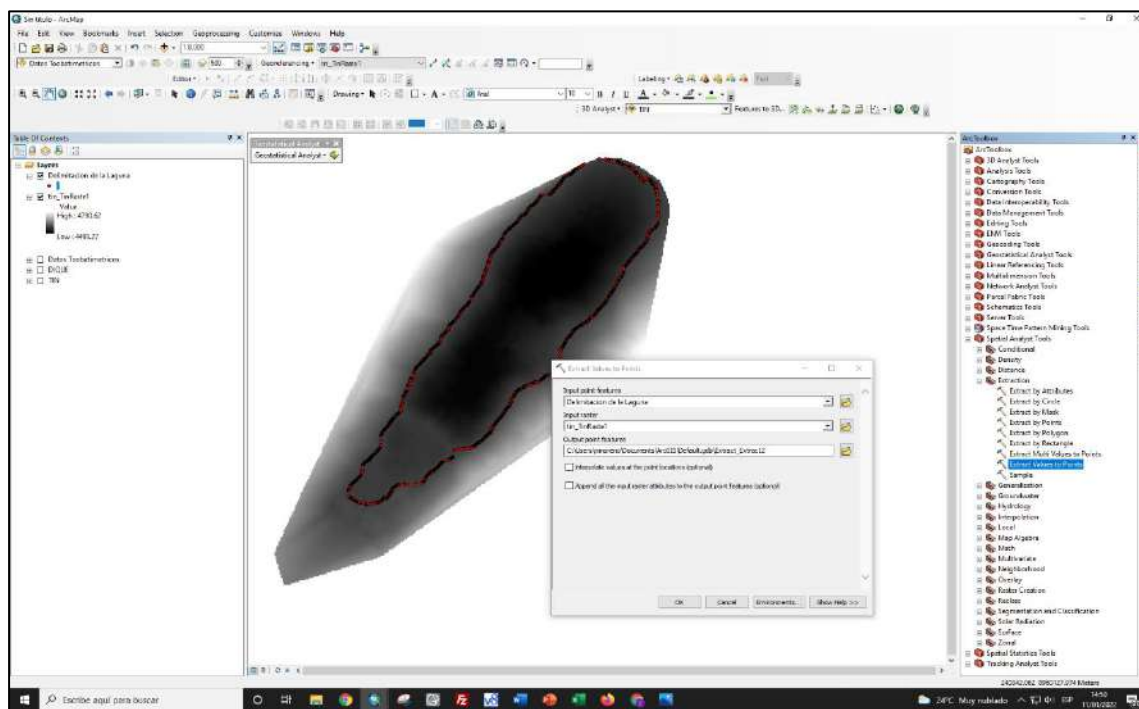


8.3 Extracción de valores altitudinales

- a) Este proceso consiste en asignarle el valor “z” del DEM a la delimitación del área de trabajo (laguna Palcacocha). Para este paso cargamos los archivos que utilizaremos en este proceso: el Modelo de Elevación Digital – DEM (formato ráster) y la delimitación de la laguna (formato vectorial tipo punto). Se selecciona la herramienta de agregar datos “Add Data” y se elige los archivos que se van a utilizar

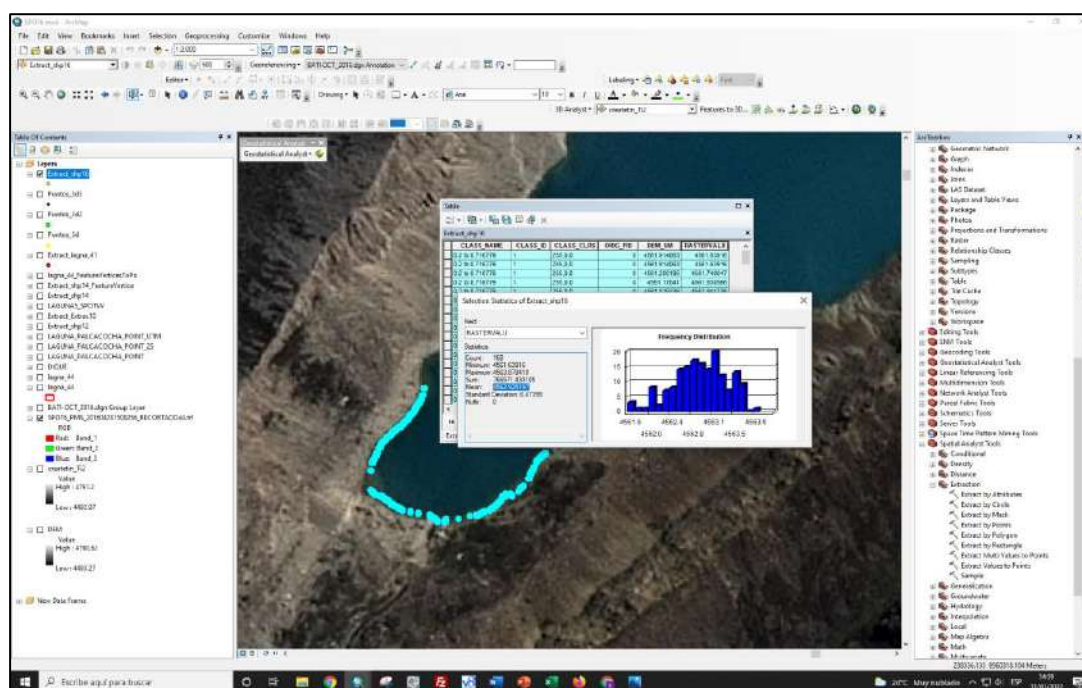


- b) El siguiente paso es utilizar la herramienta “Extraer Valores a un Punto” que se encuentra en la caja de herramientas del principales: Spatial Analyst Tools – Extraction – Extract Value to Point”





- c) La herramienta genera un nuevo campo (field) en la tabla de atributos de la delimitación del área de trabajo (dato vectorial tipo puntos) con los valores altitudinales (z) interpolados del Modelo de Elevación Digital – DEM. Se hace una selección regional de los puntos y se extrae las estadísticas (el promedio de valores altitudinales) para estimar el nivel de la superficie de la laguna Palcacocha.





Mapa Temático de estimación del nivel de la superficie de la Laguna Palcacocha generada con imagen satelital Spot6



Mapa Temático de estimación del nivel de la superficie de la Laguna Palcacocha generada con imagen satelital PeruSAT-1



AGENCIA ESPACIAL
DEL PERÚ CONIDA

DIRECCIÓN DE
APLICACIONES Y
GEOMÁTICA – DIAPG

CENTRO DE ESTUDIOS, PROCESAMIENTO DE
INFORMACIÓN E INVESTIGACIÓN PARA LA GESTIÓN
REACTIVA - CEPIG

