

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS

**DETECCIÓN DE CAMBIOS DE AGUA CON ANÁLISIS DE MEZCLA
ESPECTRAL UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO**

TITICACA, 2014 - 2023

PRESENTADA POR:

IVAN DAVID ANAHUA LARICO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PUNO - PERÚ

2024



Repositorio Institucional ALCIRA by [Universidad Privada San Carlos](https://www.upsc.edu.pe/) is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



6.63%

SIMILARITY OVERALL

SCANNED ON: 29 OCT 2024, 5:13 PM

Similarity report

Your text is highlighted according to the matched content in the results above.

● IDENTICAL
1.8%

● CHANGED TEXT
4.82%

Report #23458615

IVAN DAVID ANAHUA LARICO // DETECCIÓN DE CAMBIOS DE AGUA CON ANÁLISIS DE MEZCLA ESPECTRAL UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO TITICACA, 2014 - 2023 RESUMEN Las aguas continentales son un recurso esencial para el desarrollo de diferentes formas de vida; el lago Titicaca como cualquier otro cuerpo de agua continental presenta una gran importancia para el desarrollo sin embargo en los últimos años ha venido perdiendo cobertura de agua. El objetivo fue analizar los cambios de agua a partir del análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023. Las imágenes fueron adquiridas de LandSat 8 de la USGS en una resolución de 30x30, estas imágenes fueron procesadas y corregidas en valores digitales a reflectancia (TOA) por Google Earth Engine (GEE). La clasificación supervisada utilizada fue análisis de mezcla espectral (SMA), se aplicó el Kappa y accuracy al modelo. Para poder encontrar los cambios, se usó el análisis de componentes principales (ACP) y la prueba de KMO, posteriormente fueron cuantificados los cambios agua en km² y frecuencias acumuladas para las mismas, para encontrar la tendencia se empleó la correlación de Karl Pearson. Los resultados para el modelo SMA mostraron una buena clasificación de las zonas con agua y zonas de tierra con un valor Kappa de de 0.95 y accuracy de 0.97; para el 2014 a 2023 presentó una alta variación de cobertura de agua donde el valor de

UNIVERSIDAD PRIVADA SAN CARLOS
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TESIS
DETECCIÓN DE CAMBIOS DE AGUA CON ANÁLISIS DE MEZCLA
ESPECTRAL UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO
TITICACA, 2014 - 2023
PRESENTADA POR:
IVAN DAVID ANAHUA LARICO
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL

APROBADA POR EL SIGUIENTE JURADO:


PRESIDENTE

:


Dr. ESTEBAN ISIDRO LEON APAZA

PRIMER MIEMBRO

:


Mg. KATIA ELIZABETH ANDRADE LINAREZ

SEGUNDO MIEMBRO

:


M.Sc. FREDY APARICIO CASTILLO SUAQUITA

ASESOR DE TESIS

:


Mg. ELVIRA ANANI DURAND GOYZUETA

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub Área: Ingeniería Ambiental

Línea de Investigación: Sensores remotos

Puno, 07 de noviembre del 2024.

DEDICATORIA

A nuestro padre celestial, por guiarme en el camino de la vida para poder crecer y fortalecer cada día, además de ser la luz de mi vida.

A mi esposa por brindarme su gran apoyo incondicional, por estar siempre presente en todos los momentos con mucho cariño y amor.

A mi madre y hermanos por ese gran cariño y apoyo, además de ser la fuerza de superación, para seguir creciendo.

A mis amigos por estar ahí, mostrando su gran ayuda en situaciones más necesitadas de mi formación y recuerdos llevados en la formación profesional.

Ivan David Anahua Larico

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Privada San Carlos, por brindarme una formación profesional para el desarrollo de mi región.
- A la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental
- A los miembros de jurado calificador, por ser parte de esta investigación
- A mi asesor Mg. Elvira Ananí Durand Goyzueta por brindarme el apoyo y la orientación para la culminación de esta investigación.
- Al Ing. William Lucio Najar Mendoza por su gran apoyo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE GENERAL	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ANEXOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1.1. Problema General	13
1.1.2. Problemas específicos	13
21.2. ANTECEDENTES	13
1.2.1. Antecedentes internacionales	13
1.2.2. Antecedentes nacionales	17
1.2.3. Antecedentes locales	18
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.3.1. Objetivo general	18
1.3.2. Objetivos específicos	18

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO	19
2.1.1. El lago Titicaca.	19
	3

2.1.2. Nivel de agua.	19
2.1.3. Plantas acuáticas del lago Titicaca.	19
2.1.3.1. El lago Titicaca como hábitat de aves silvestres.	20
2.1.3.2. Lago Titicaca como fuente de diversidad íctica.	20
2.1.4. Teledetección.	20
2.1.5. Espectro electromagnético.	21
2.1.6. Imágenes satelitales.	22
2.1.7. Sistemas de información geográfica.	24
2.2. MARCO CONCEPTUAL	24
2.3. MARCO NORMATIVO	25
2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	26
2.4.1. Hipótesis general	26
2.4.2. Hipótesis específicas	26
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1. ZONA DE ESTUDIO	27
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA	28
3.2.1. Población	28
3.2.2. Muestra	28
3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS	29
3.3.1. Métodos	29
3.3.2. Metodologías por objetivos específicos	29
3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	33
3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO	34
3.5.1. Para objetivo 01	34
3.5.2. Para el objetivo 02	35
3.5.3. Para objetivo 03	36

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. DIFERENCIACIÓN DE ZONAS CON AGUA Y ZONAS DE TIERRA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE MEZCLA ESPECTRAL (SMA) UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO TITICACA BAHÍA PUNO, 2014 - 2023.	38
4.2. COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL SMA MULTITEMPORAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO TITICACA BAHÍA PUNO, 2014 - 2023	41
4.3. CUANTIFICACIÓN EN KILÓMETROS CUADRADOS LOS CAMBIOS DE SUPERFICIE DE AGUA UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO TITICACA BAHÍA PUNO, 2014 - 2023.	43
4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS	45
4.4.1. Prueba de hipótesis para el objetivo 01.	45
4.4.2. Prueba de hipótesis para el objetivo 02.	46
4.4.3. Prueba de hipótesis para el objetivo 03.	46
CONCLUSIONES	48
RECOMENDACIONES	49
BIBLIOGRAFÍA	50
ANEXOS	53

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01: Resolución espectral de Landsat-8.	23
Tabla 02: Operacionalidad de Variables.	34
Tabla 03: valores de interpretación de la matriz Kappa	35
Tabla 04: valores de interpretación de KMO	36
Tabla 05: valores de interpretación de Karl Pearson	37
Tabla 06: Valores de Kappa y Accuracy para la clasificación supervisada de SMA del lago Titicaca Bahía de Puno.	39
Tabla 07: Cambios de superficie de agua del lago Titicaca Bahía de Puno periodo 2014 - 2023.	43

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01: Sistema de teledetección.	21
Figura 02: Espectro electromagnético	22
Figura 03: Mapa de ubicación de la zona de estudio.	28
Figura 04: Esquematización de un píxel con tres coberturas: A, B y C.	30
Figura 05: Clasificación supervisada mediante el SMA para el periodo 2014 - 2023.	40
Figura 06: Biplot de ACP del 2014 a 2023 de lago Titicaca bahía Puno	42
Figura 07: Mapa de cambios de agua del lago Titicaca bahía de Puno durante el periodo 2014 - 2023.	44
Figura 08: Resultados de correlación Pearson	47

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 01: Matriz de consistencia.	54
Anexo 02: Matriz de Correlación de Pearson	55
Anexo 03: Proceso de obtención de KMO y Bartlett para ACP	55
Anexo 04: Proceso de Obtención de la Correlación de Pearson y su prueba de normalidad	56
Anexo 05: Proceso de obtención de índice Kappa en Rstudio	56
Anexo 06: Ploteo de cobertura de agua clasificado por SMA para 2023	57

RESUMEN

Las aguas continentales son un recurso esencial para el desarrollo de diferentes formas de vida; el lago Titicaca como cualquier otro cuerpo de agua continental presenta una gran importancia para el desarrollo, sin embargo en los últimos años ha venido perdiendo cobertura de agua. El objetivo fue analizar los cambios de agua a partir del análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023. Las imágenes fueron adquiridas de LandSat 8 de la USGS en una resolución de 30x30, estas imágenes fueron procesadas y corregidas en valores digitales a reflectancia (TOA) por Google Earth Engine (GEE). La clasificación de cobertura utilizada fue análisis de mezcla espectral (SMA), se aplicó el Kappa y accuracy al modelo. Para poder encontrar los cambios, se usó el análisis de componentes principales (ACP) y la prueba de KMO, posteriormente fueron cuantificados los cambios de agua en km² y frecuencias acumuladas para las mismas, para encontrar la tendencia se empleó la correlación de Karl Pearson. Los resultados para el modelo SMA mostraron una buena clasificación de las zonas con agua y zonas de tierra con un valor Kappa de de 0.95 y accuracy de 0.97; para el 2014 a 2023 presentó una alta variación de cobertura de agua donde el año 2023 perdió mayor cobertura, el valor de Kaiser Meyer Olkin (KMO) para ACP fue de 0.77; la cobertura de agua perdida para periodo de diez años fue de -105.78 kilómetros cuadrados acumulados perdidos para el lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023. La correlación de Pearson mostró un valor de -0.77, estadísticamente significativa con P valor de 0.00935, lo que indica que el lago Titicaca Bahía Puno ha disminuido en su cobertura de agua en ese periodo de tiempo.

Palabras clave: Agua, Cambios de cobertura, Lago Titicaca, SMA, Teledetección.

ABSTRACT

Continental waters are an essential resource for the development of different forms of life; Lake Titicaca, like any other continental body of water, is of great importance for development; however, in recent years it has been losing water coverage. The objective was to analyze water changes from spectral mixing analysis (SMA) using multi-temporal images of Lake Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023. The images were acquired from LandSat 8 of the USGS in a resolution of 30x30, these images were processed and corrected in digital values to reflectance (TOA) by Google Earth Engine (GEE). The coverage classification used was spectral mixture analysis (SMA), Kappa and accuracy were applied to the model. In order to find the changes, the principal component analysis (PCA) and the KMO test were used, subsequently the water changes in km² and accumulated frequencies for them were quantified, to find the trend the Karl Pearson correlation was used. The results for the SMA model showed a good classification of areas with water and land areas with a Kappa value of 0.95 and accuracy of 0.97; for 2014 to 2023 it presented a high variation in water coverage where the year 2023 lost greater coverage, the Kaiser Meyer Olkin (KMO) value for ACP was 0.77; The coverage of lost water for a ten-year period was -105.78 accumulated square kilometers lost for Lake Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023. The Pearson correlation showed a value of -0.77, statistically significant with P value of 0.00935, which indicates that Lake Titicaca Bahía Puno has decreased in its water coverage in that period of time.

Keywords: Water, Coverage changes, Lake Titicaca, SMA, Remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El Cambio climático se entiende como las modificaciones que puede suceder a lo largo del tiempo, y uno de los factores que más define e involucrado es la temperatura, el ingreso de la radiación solar por la atmósfera una parte es emitida al exterior, pero por la presencia de gases como el dióxido de carbono y el vapor de agua hace que la temperatura se mantenga a un nivel óptimo para la vida, sin ese efecto la temperatura sería de aproximado de 33°C más menor que el actual (Tolba, 1992).

los gases de efecto invernadero contribuyen al calentamiento global debido a que absorben radiación infrarroja del sol, lo que hace que aumente la temperatura de la tierra, los principales gases de efecto invernadero son el metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, los fluorocarbonados, vapor de agua y ozono troposférico, lo que hace que exista variación de climas en diferentes partes del mundo (Aqua, s. f.).

Los recursos hídricos como fuente esencial del desarrollo de la vida puede ser afectado por el cambio climático, los efectos del cambio climático podrían estar con eventos de precipitación intensa afectando la calidad del agua superficial, subterránea, polución de los suministros de agua, además de aumento de áreas de sequía conllevando a una mayor extensión del estrés hídrico (Bates et al., 2008).

El lago Titicaca como cualquier recurso hídrico, está envuelto por el cambio climático, la disminución de las precipitaciones conlleva al aumento de las áreas de sequía y es de importancia realizar monitoreos sobre los cambios de su cobertura de agua.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La hidrosfera es uno de los componentes principales para el desarrollo de toda forma de vida en el planeta, de los cuerpos de agua se encuentra el 97,5 % en los océanos, únicamente un 2,5% es agua dulce. Casi el 80% del agua dulce está compuesto en glaciares, nieve y hielo en los casquetes polares; el agua subterránea representa el 19 % y el agua de superficie representa el 1 %, que es accesible. Esta cantidad de agua superficial fácilmente accesible se encuentra en humedales (38 %) y lagos (52 %) (Fernandez, 2012). Cualquier cambio en los lagos que representa en 52% del 1% de agua de superficie, podría afectar a la gran diversidad de especies de flora y fauna que alberga estos cuerpos de agua, la afección a las especies perjudica al mismo tiempo al ser humano.

El calentamiento global es uno de los problemas ambientales más presentes y son generados por la emisión de gases de efecto invernadero, ocasionado por las actividades antropogénicas, suscitando así el cambio climático. El incremento de temperatura global hace que muchas de las fuentes de agua dulce presenten cambios en su distribución y volumen, principalmente en la parte continental, esto conlleva pérdidas de agua dulce en los nevados que alimentan a los sistemas lóticos y por último a los lenticos, lo que generaría un déficit hídrico.

El lago Titicaca como cuerpo de agua léntico es un sistema endorreico que se percibe afectado por el calentamiento global y cambio climático, además de agregarse el

fenómeno del niño y el niño costero. Así también la disminución de precipitaciones pluviales y la alteración de períodos de lluvia ocasiona disminución en su nivel de agua en el transcurso del tiempo; lo que podría ocasionar alteración y/o estrés para las especies hidrobiológicas, macrófitas, aves que habitan en el lago y a las actividades antrópicas como la acuicultura, captación de agua para el consumo, riego y el turismo, . Es de vital importancia realizar modelado, mapeo y monitoreo constante de cambios de agua para tener mayor control, la aplicación del Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre el análisis de mezcla espectral (SMA) multitemporal permitirá detectar y cuantificar los cambios de superficie de agua en el Lago Titicaca.

1.1.1. Problema General

¿Los cambios de agua serán detectables a partir de análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca, 2014 - 2023?.

1.1.2. Problemas específicos

- ❖ ¿ La diferencia entre la zona con agua y la zona de tierra serán detectables mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023?.
- ❖ ¿Existirá variación del análisis de mezcla espectral (SMA) mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023?.
- ❖ ¿El lago Titicaca presentará en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023?.

21.2. ANTECEDENTES

Los estudios que se realizaron anteriormente de acuerdo al trabajo de investigación, se presenta desde el contexto internacional, nacional y local, como se muestra a continuación:

1.2.1. Antecedentes internacionales

- Salih (2023), en su estudio, mapeó áreas urbanizadas utilizando un modelo de análisis de mezcla espectral (SMA) en el Oasis de Al-Ahsa en la región oriental de

Arabia Saudita mediante el análisis de imágenes Landsat, e imágenes Sentinel-2A, adquiridas entre 1990 y 2020. Utilizó el análisis de componentes principales (PCA) para construir y seleccionar miembros finales, y luego aplicó SMA a cada imagen para extraer imágenes urbanas/urbanizadas. fracciones. El rendimiento de la clasificación SMA se evaluó mediante mapas de error de fracciones y una matriz de confusión. Los resultados muestran que el área urbana del Oasis de Al-Ahsa se había expandido rápidamente durante 2010-2020 con una tasa de expansión de casi el 9%. Los resultados también indicaron que el modelo SMA proporciona altas precisiones (precisión general = ~95% a 100%) para el mapeo urbano de un oasis en una región árida y semiárida que se ve perturbada por el problema de los píxeles mixtos, como el Al- Oasis de Ahsa en el este de Arabia Saudita.

- Rudorff et al. (2006), realizaron un análisis de mezcla espectral de los datos de reflectancia de la superficie de Hyperion, en el rango visible-infrarrojo cercano de 457-885 nm, para identificar miembros finales espectralmente distintos de los tipos de agua de la llanura aluvial del Amazonas y mapear sus abundancias fraccionarias. Los resultados mostraron que las abundancias fraccionarias de los miembros finales se correlacionan significativamente con las concentraciones medidas de sustancias ópticamente activas. Observaron importantes efectos de mezcla espectral no lineal en las complejas aguas de la llanura aluvial del Amazonas, que deben tenerse en cuenta para lograr una mejor caracterización predictiva de subpíxeles de la composición del agua.
- Ferrero et al. (2002) En su estudio, señalan que la matriz de varianza-covarianza o la matriz de correlación pueden utilizarse para aplicar ACP; en teledetección, el análisis de componentes principales se menciona como una técnica importante como paso previo para otros análisis. Usar una mezcla de color con los primeros componentes principales generalmente hace que las coberturas sean más distintivas que usar bandas. Por otro lado, en las aplicaciones multitemporales que buscan detectar

cambios, se seleccionan los componentes más recientes porque proporcionan información no común.

- Sandoval et al. (2020), mencionan que la realización de investigaciones sobre la detección y el seguimiento de cuerpos de agua es fundamental para comprender los procesos ecológicos e hidrológicos. y se dispone de imágenes satelitales de alta resolución espacial que se pueden adquirir libremente, lo que permite abarcar áreas de estudio amplias. Para detectar y demarcar cuerpos de agua, se utilizó el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI). Previo al proceso de validación, se recomienda observar estos cuerpos de agua durante épocas de secas para detectar diferencias y hacer un inventario de cuerpos de agua permanentes o temporales para relacionar la variación y el tamaño de los cuerpos de agua con las condiciones climáticas. Los píxeles NDVI de los cuerpos de agua oscilaron entre 0.1 y 0.8, con una mediana de 0.3 y cuartiles de 0.2 a 0.4.
- Karimi & Namdari (2019), evaluaron la gravedad y el alcance de la desertificación en Irán utilizando imágenes de satélite Landsat con una resolución espacial de 30 m durante 1984 y 2015. Aplicaron nuevas técnicas de teledetección (métodos de análisis de mezclas espectrales). El análisis de mezcla espectral (SMA) es una técnica para estimar la proporción de cada píxel que está cubierto por una serie de tipos de cobertura conocidos en píxeles mixtos. Estudiaron los cambios en la vegetación, el suelo, el agua y las marismas de todo el país. Los resultados mostraron que alrededor de 227.000 km² de Irán sufrieron una desertificación de baja intensidad en los últimos 32 años. Además, las zonas más afectadas por la desertificación y las masas de agua secas fueron de unos 33.000 y 5.000 km², respectivamente.
- Mancilla (2021), Según él, la Laguna de Aculeo se secó por completo en 2018. Esto demuestra la importancia de mantener un seguimiento constante de la superficie del agua en los cuerpos de agua para tomar medidas de control. También presentó la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP) para detectar cambios a nivel superficial en cuerpos de agua mediante imágenes satelitales multitemporales

utilizando índices de diferencia de agua normalizado (NDWI) y índices de diferencia de agua normalizado movido (MNDWI). Estos índices se utilizaron para identificar y medir los cambios en el Lago Peñuelas y la Laguna de Aculeo.

- Seeley et al. (2023), en su estudio compararon dos técnicas de clasificación supervisada, la máquina de vectores de soporte (SVM) y el análisis de mezcla espectral (SMA), para evaluar su capacidad para mapear *M. polymorpha* en 28.000 kilómetros cuadrados. Descubrieron que, si bien los modelos SVM y SMA exhiben una precisión de puntuación bruta similar en el conjunto de pruebas (96,0% y 93,4%, respectivamente), SVM reproduce mejor la distribución espacial de *M. polymorpha* que SMA. Desarrollaron un conjunto de datos final de presencia de *M. polymorpha* de 2 m × 2 m y un conjunto de datos de densidad de *M. polymorpha* de 30 m × 30 m utilizando clasificaciones SVM que se han puesto a disposición del público para su uso en aplicaciones de conservación. Se pueden lograr clasificaciones de especies precisas a gran escala, pero las métricas para las evaluaciones del desempeño del modelo deben tener en cuenta la variación espacial de la precisión del modelo.
- Gonzáles (2021), en su trabajo de tesis “Análisis multitemporal de los lagos de Michoacán mediante teledetección” estudió los cambios de agua en un periodo de tiempo establecido mediante herramientas de teledetección y sistemas de información geográfica para cuatro lagos y entender su relación con las fluctuaciones de temperatura, evapotranspiración, aridez y cobertura forestal dentro de la cuenca, a partir de las imágenes recopiladas del periodo de 1993-2019, encontró el peor escenario para el lago Cuitzeo con una pérdida de 85.8% de la superficie de espejo de agua comparando con la mapa base de INEGI. siendo así el lago con mayor pérdida en porcentaje comparado con los lagos Pátzcuaro y Zirahuén con 25 y 16 % respectivamente.
- Sousa et al. (2022), en su estudio “Análisis Multitemporal del Embalse de Agua del Embalse de Jaburu I mediante Herramientas de teledetección en los años 2013 a 2020” realizaron un análisis multitemporal del espejo de agua de Açude Jaburu,

ubicado en los municipios de Ubajara y Tianguá, Ceará, de 2013 a 2020. Para ello se aplicaron el Índice de Diferencia de Agua Normalizado (NWDI), utilizando imágenes satelitales Landsat 8, 1 colección de nivel 1, LANDSAT/LC08/C01/T1_RT, calibrado para reflectancia en la parte superior de la atmósfera (TOA), a través de las bandas 3 y 5, con una resolución espacial original de 30 m. Los principales resultados mostraron que los años los que mayor descenso fueron 2014 y 2015 con 192.21 y 175.05 hectáreas de espejo de agua menor, respectivamente. Los años 2018 y 2019 mostraron expansión, con 130.86 y 295.65 hectáreas, respectivamente. Para evaluar el datos abordados en este trabajo en cuanto a la correlación con las precipitaciones en la zona, utilizaron la prueba de correlación de Spearman, quien presentó un valor de p igual a 0.9349, asumiendo que no existió relación entre la precipitación y el área de la espejo de agua.

- Hernández & Chacón (2013), utilizaron imágenes satelitales tomadas en diferentes momentos a lo largo de tres décadas de recopilación de datos para determinar cómo el espejo de agua de la laguna de Fúquene cambiaba con el tiempo. El objetivo principal del estudio fue identificar las áreas del cuerpo de agua de la laguna Fúquene utilizando el conteo de píxeles. Estas áreas se obtuvieron después de realizar clasificaciones no supervisadas pero con firmas espectrales preestablecidas. Los resultados mostraron una disminución significativa en el cuerpo de agua de la laguna durante la primera década del 2000.
- Acevedo-Sánchez (2021), en su trabajo “Análisis de cambios en cuerpos de agua mediante el tratamiento de imágenes multiespectrales” menciona que los cambios entre los meses de junio para los años 2014 y 2020 son muy notorios, en la parte sur de la laguna Serena presentó una disminución del 73%, sin embargo, en el intervalo de 3 años la reducción de volumen de agua estaba presente pero en menor medida.

1.2.2. Antecedentes nacionales

- Campaña & Gines (2021), en sus estudios titulado “Análisis multitemporal del NDDI, comparación con el NDWI para determinar la sequía en la Reserva Nacional de

Tumbes, Perú, 1986 - 2019”, en el área de la reserva nacional de Tumbes se clasificó como área con poca sequía y bajo contenido de humedad, cuyos valores de NDWI estuvieron comprendidos desde 0,2 – 0,7, en la mayoría de los años el valor fue de 0,2 - 0,4, el máximo valor de 0,7 fue poco frecuente, los valores obtenidos en este análisis estuvieron dentro de los rangos establecidos para este índice, el área en promedio de la RN Tumbes fue de 18645,68 ha que presentaban sequía débil y con contenido de humedad bajo.

1.2.3. Antecedentes locales

- Calcina-Flores (2021), Examinó la pérdida de espejo de agua y biomasa en la Bahía Interior de Puno en su investigación. También calculó el porcentaje de Titora con periodos agrupados de cada 5 años, con respecto al año base de 1984; el porcentaje de área disminuyó el 2.01% en 1985, el 27.82% en 1995 y el 12.66% en 2019. El porcentaje de área disminuyó en 1985 en un 29.44%, luego aumentó significativamente en 2000 a un 160.20% y luego disminuyó en 2019.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Analizar los cambios de agua a partir del análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diferenciar zonas con agua y zonas de tierra seca mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023
- Comparar la variación del SMA multitemporal mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023
- Cuantificar en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, CONCEPTUAL E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. El lago Titicaca.

El lago Titicaca es la superficie navegable más alta del mundo ubicada a 3.809 metros sobre el nivel del mar. El lago mismo marcha casi como un sistema cerrado, evacuando su único emisario, en el contexto hidrológico actual, menos del 5 % de las mermas totales de agua. está sometida a una fuerte evaporación, y con una tasa de residencia media de 63 años, las aguas tienen un contenido en sales disueltas de cerca de un gramo por litro, es la que diferencia de las aguas mucho más dulces de la mayoría de los lagos de montaña andinos

2.1.2. Nivel de agua.

En la investigación registrada sobre los niveles del lago Titicaca entre 1915 y 2009, la variación del nivel fue de 6,37 m por año, con un mínimo de -3,72 m en diciembre de 1943 y un máximo de 2,65 m en abril de 1986, con relación al cero de la escala limnimétrica. La longitud del ciclo anual varió de 1,80 m (1986) a 0,04 m (1983)

2.1.3. Plantas acuáticas del lago Titicaca.

El lago Titicaca tiene una biodiversidad de plantas acuáticas, quienes brindan refugio y sustento para numerosas especies ícticas y aves acuáticas. Existen trece especies que se fijan en el fondo y dos flotantes

Existe otra manera de clasificación es referenciado a los estratos del agua y las clasifican entre limnófitas o sumergidas (6), las anfibas o helófitas (7), y las anfifitas o flotantes (2) que se pueden apreciar en más detalle

2.1.3.1. El lago Titicaca como hábitat de aves silvestres.

Las aves forman un grupo de mucha importancia debido a sus colores vistosos siendo los llachales, totorales su medio de hábitat, y se alimentan de estas macrófitas, peces, artrópodos, moluscos, platelmintos, insectos, etc. La mayoría de las aves hacen uso de las macrófitas como la totora para poner sus nidos.

2.1.3.2. Lago Titicaca como fuente de diversidad íctica.

La diversidad íctica nativa en el lago Titicaca está conformado principalmente por el género *Orestias*, seguido de *Trichomycterus*, e introducidas como el género *Odonthestes* y *Oncorhynchus*, el género *Orestias* presenta una alta diversidad biológica con atributos que muestran su capacidad adaptativa a ambientes cambiantes de las características del Titicaca

2.1.4. Teledetección.

La teledetección es una técnica para captar imágenes terrestres a distancia, donde la adquisición de datos de la superficie terrestre se dan desde sensores instalados en plataformas espaciales, se requiere un sensor que sea capaz de captar radiación electromagnética de la cobertura de la Tierra permitiendo obtener información de un objeto sin estar en contacto con él, simplemente escaneándolo a distancia, , lo que hace que exista interacción energética con la tierra y el sensor

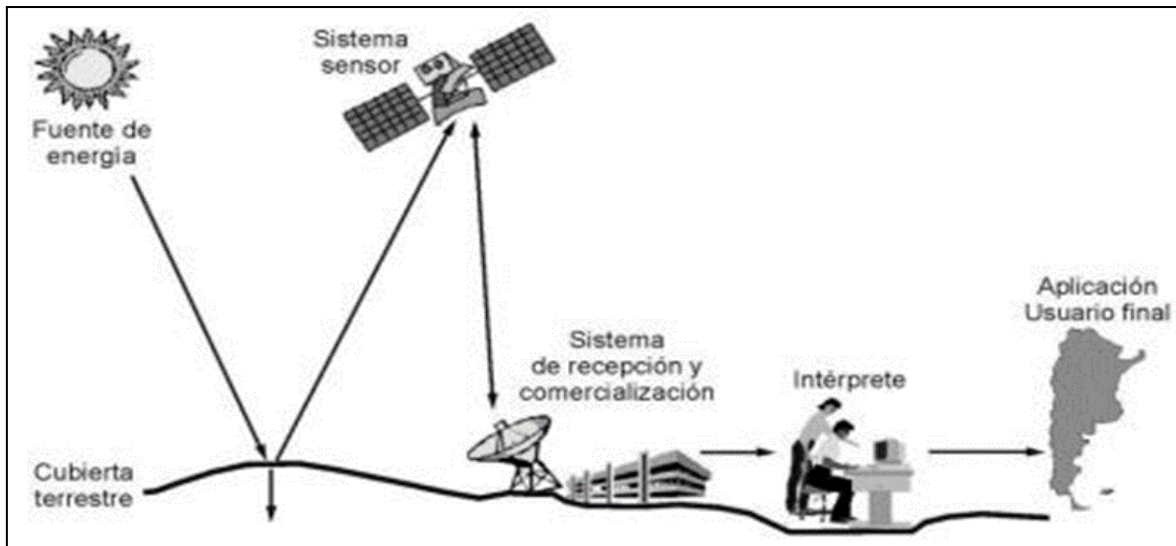


Figura 01: Sistema de teledetección.

2.1.5. Espectro electromagnético.

La luz es una fuente de energía originada de la estrella cercana como el sol, que de alguna manera genera, viaja por el espacio por mucho tiempo y finalmente percibe nuestros ojos. O sea, estamos percibiendo energía e información del pasado y solo en una pequeña región donde nuestros ojos son sensibles, donde el espectro es muy amplio y se extiende por todo el Universo. Se puede percibir al espectro electromagnético como cualquier energía radiante en función a su tipo de longitud de onda

El espectro electromagnético presenta partes y las más utilizadas en teledetección (de acuerdo a su longitud de onda).

→ **El espectro visible:** Esta zona oscila entre 0,4 y 0,7 micrómetros. Esta es la única radiación electromagnética que el ser humano puede captar. Dentro del espectro visible, se pueden distinguir tres partes: la azul (de 0,4 a 0,5 m), la verde (de 0,5 a 0,6 m) y la roja (de 0,6 a 0,7 m).

→ **El infrarrojo cercano (NIR, Near Infrared):** esta región se encuentra dentro del espectro comprendido entre 0,7 y 1,3 micrómetros aproximadamente. y es de mucha importancia porque permite discriminar masas vegetales y también las de humedad porque estas cubiertas presentan picos de reflectancia en este dentro de su intervalo del espectro.

- **El infrarrojo medio (SWIR, Short Wave Infrared):** se conoce la área del espectro que se divide en 1,3 y 8 micrómetros. Funciona perfectamente para estimar la cantidad de humedad en la vegetación y detectar focos de temperatura.
- **El infrarrojo térmico (TIR, Thermal Infrared):** La área del espectro que se divide más o menos en 8 y 100 mn y capta la mayoría de las cubiertas terrestres que emiten calor se conoce como "área del espectro".
- **Las microondas:** incluyen la área del espectro que va desde un milímetro hasta un metro. Este tipo de radiación se utiliza en teledetección porque es bastante clara para las capas de nubes.

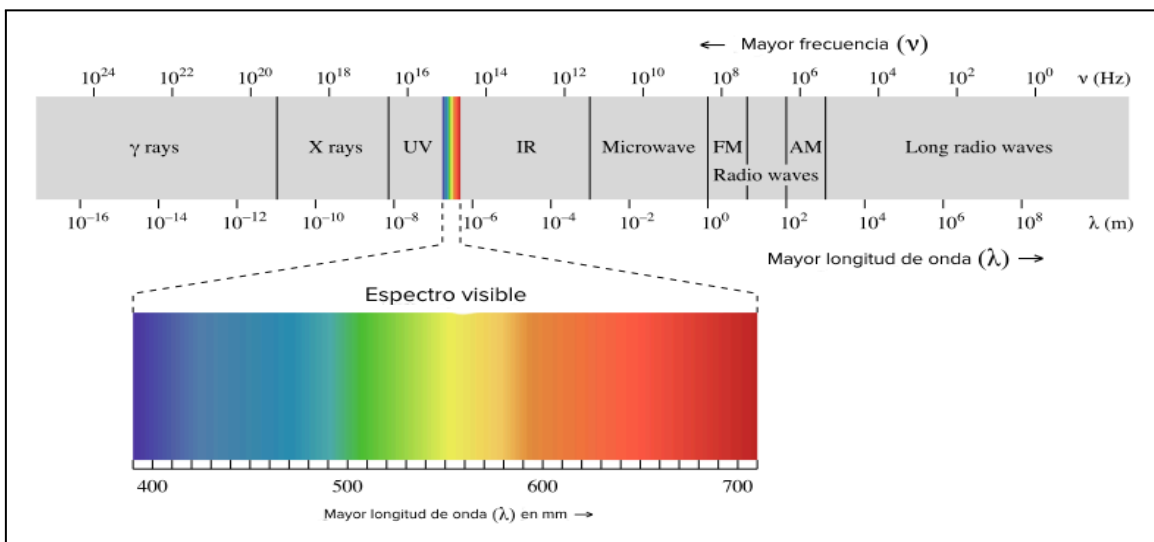


Figura 02: Espectro electromagnético

2.1.6. Imágenes satelitales.

En la actualidad, los avances tecnológicos nos permiten recopilar imágenes de observación de la tierra a gran velocidad. Existen tres categorías de imágenes satelitales (Sánchez, 2012), y a continuación describiremos cada una de ellas.

2.1.6.1. Landsat-8

Las imágenes Landsat-8 proporcionan datos que responden a los amplios y numerosos deseos de las empresas, la tecnología, la enseñanza, el gobierno y la protección nacional. El reto del Programa Landsat es ofrecer la adquisición repetible de estadísticas multispectrales de mediana resolución del suelo terrestre a escala internacional

Tabla 01: Resolución espectral de Landsat-8.

Banda	Nombre	Longitud de Onda (µm)	Resolución
1	Aerosol Costa	0.43 - 0.45	30
2	Azul	0.45 - 0.51	30
3	Verde	0.53 – 0.59	30
4	Rojo	0.64 – 0.67	30
5	NIR	0.85 – 0.88	30
6	SWIR 1	1.57 – 1.65	30
7	SWIR 2	2.11 – 2.29	30
8	Pancromática	0.50 – 0.68	15
9	Cirrus	1.36 – 1.38	30
10	TIRS 1(infrarrojo térmico de onda larga)	10.60 – 11.19	100
11	TIRS 2 (infrarrojo térmico de onda larga)	11.50 – 12.21	100

Fuente: (USGS, 2014).

Las imágenes satelitales constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1 a 7 y 8 a 11. La banda azul ultra 1 es beneficiosa para la investigación científicas costeras y de aerosoles. La banda 9 es beneficiosa para la determinación de cirros. La resolución espacial para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros de resolución. Las bandas térmicas 10 y 11 son útiles para presentar temperaturas de suelo más correctas y adquirir hasta cien metros

★ Imágenes pancromáticas.

Se utiliza un sensor digital para capturar imágenes pancromáticas. La mayoría de las veces, esta sola banda cubre el espectro infrarrojo y visible cercano. Las imágenes en blanco y negro se utilizan para representar los datos pancromáticos. Las imágenes pancromáticas permiten localizar, identificar y medir accidentes superficiales y objetos principalmente por su apariencia física, es decir, por su forma, tamaño y orientación. Además, pueden identificar elementos generados por la acción humana, como edificios, carreteras, veredas, infraestructura urbana y vehículos.

2.1.7. Sistemas de información geográfica.

El término SIG o Sistema de Información Geográfica (SIG) se utiliza para referirse a numerosos estándares interrelacionados, aunque no por ello distinto. Por un lado, se utiliza para consultar el programa informático o software utilizado para controlar los mapas, y esta es la sensación con la intención de ser utilizado en esas notas

Un sistema de datos geográficos (SIG) es un marco para acumular, tratar y estudiar registros, arraigado en la generación geográfica, el SIG integra diferentes formas de estadística. Analiza áreas y organiza capas de datos especiales para su visualización mediante mapas y escenarios tridimensionales

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Cobertura: Todo lo que puede verse en la superficie y debajo de la tierra, como los seres vivos (biota), las masas de agua superficiales y subterráneas y los edificios construidos por el hombre. actividades humanas, etc.

Lagos: es una zona en la que una pendiente del paisaje ha provocado la acumulación de agua superficial procedente de la escorrentía de las precipitaciones (y, a veces, de filtraciones de aguas subterráneas).

Tendencia: es una sucesión creciente de máximos y mínimos en una trayectoria determinada para un marco temporal determinado

Métodos de mezclas espectrales: permiten estimar la fracción de elementos puros presentes en cada píxel mediante una serie de muestras reconocidas en la escena.

Calentamiento global: Se trata de un aumento de las temperaturas medias de los océanos y la atmósfera a lo largo del tiempo

Radiación solar: Debido a la emisión de energía solar en forma de radiación electromagnética, se trata de un fenómeno físico.

R-Studio: Este entorno de desarrollo integrado en el lenguaje de programación R se centra en el análisis estadístico y las instantáneas. Proporciona herramientas para gestionar espacios de trabajo, una consola, visuales y un editor de sintaxis para la ejecución amigable o sencilla de lenguajes de códigos

QGIS: Es un programa de software de suministro abierto para sistemas GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows. Permite manejar formatos ráster y vectoriales como shp, además de bases de datos especiales

2.3. MARCO NORMATIVO

Los recursos naturales y otros componentes ambientales cumplen funciones que permiten preservar las condiciones de los ecosistemas y el medio ambiente, de acuerdo a la Ley N° 28611, Ley General del Ambiente, produciendo beneficios que son aprovechados sin retribución ni compensación. En consecuencia, a fin de asegurar la conservación de los ecosistemas, la diversidad biológica y el medio ambiente, el Estado establece mecanismos para evaluar, compensar y mantener la prestación de dichos servicios ambientales.

La Ley de Conservación y Uso Sostenible de la Diversidad Biológica (Ley N° 26839). De conformidad con los artículos 66 y 68 de la Constitución Política del Perú, esta ley regula la conservación de la variedad biológica y el uso sostenible de las partes que la componen.

La conservación y el uso racional de la diversidad biológica se enmarcan en el desarrollo sostenible e implican:

a) para sostener los procesos ecológicos cruciales que son necesarios para la supervivencia de las especies, así como para proteger la diversidad de ecosistemas, especies y genes.

2.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

2.4.1. Hipótesis general

Los cambios de agua a partir del análisis de mezcla espectral (SMA) son detectables utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Existe diferencia en zonas con agua y zonas de tierra detectables mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.
- Existe variación detectable en el análisis de mezcla espectral (SMA) mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.
- El lago Titicaca presenta en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales bahía Puno, 2014 - 2023

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. ZONA DE ESTUDIO

La Bahía Mayor de Puno es un área acuática con una superficie cercana a los 540 km², formada por las penínsulas de Capachica y Chucuito, y tiene una profundidad media de 35 metros. En el sector norte, desemboca el río Coata. La bahía alberga 29,150 hectáreas de totorales y forma una parte importante de la Reserva Nacional del Titicaca (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017). Como se muestra en la figura 03.

Este cuerpo de agua es la principal fuente de agua potable para la ciudad de Puno, y la toma de agua se encuentra en la zona de Chimú, a 400 metros del acceso al canal de navegación (Ocola Salazar & Laqui Vilca, 2017).

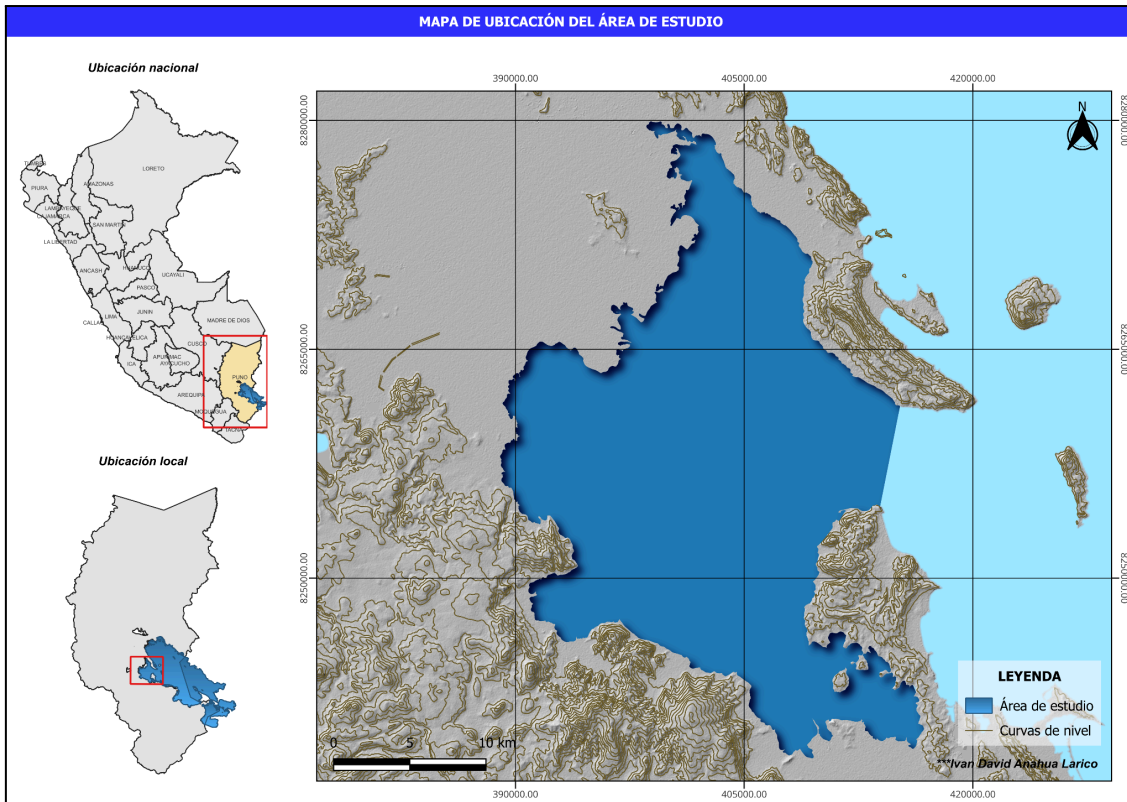


Figura 03: Mapa de ubicación de la zona de estudio.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

Se consideró la población de estudio por todas las imágenes satelitales tomadas por el satélite Landsat-8 durante el periodo del 2014 al 2023, estas imágenes fueron descargadas de la USGS.

3.2.2. Muestra

El tipo de muestreo fue de selección directa y se basó específicamente en las imágenes satelitales de 11 bandas espectrales tomadas por Landsat 8 de los años 2014 al 2023, las cuales tuvieron una nubosidad al 5%; para la selección de las imágenes se tomó el criterio de elegir una imagen del periodo secas (septiembre - diciembre), con el fin de poder realizar una mejor lectura; se eligió estos meses por la presencia de poca nubosidad.

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS

3.3.1. Métodos

Se utilizaron imágenes multiespectrales de un periodo de diez años (2014 -2023). Se utilizó Google Earth Engine (GEE) y el Software R para el procesamiento de imágenes.

3.3.2. Metodologías por objetivos específicos

Método inductivo: Se refiere a la capacidad de razonamiento inductivo, que parte de indicios concretos y conduce a inferencias específicas. El enfoque deductivo se describe de dos maneras: primero, como un razonamiento que va de lo general a lo específico; y segundo, como la aplicación diligente de una regla para obtener un resultado

Método deductivo: Se trata de un proceso mental en el que la información pasa de lo general a lo específico. Comienza con una o varias premisas y extrae una conclusión a partir de ellas. Tanto en la vida cotidiana como en el estudio académico, se emplea con frecuencia

Técnica de observación: Es el proceso de examinar atentamente una cosa para asimilar plenamente la naturaleza del todo, incluido su conjunto de datos, hechos y fenómenos

Metodología para el objetivo específico O1: Diferenciación de zonas con agua y zonas de tierra mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca, 2014 - 2023.

A. Obtención de imágenes multiespectrales.

Las imágenes multiespectrales y multitemporales fueron obtenidas de Landsat 8 (OLI / TIRS) de la USGS, con una nubosidad no mayor al 5%, con resolución de 30m. seleccionado entre los meses de octubre a diciembre de cada año. Las imágenes fueron obtenidas en formato Tif, compuestos de las 10 bandas espectrales.

Se realizó un pre-procesamiento de las imágenes y se realizó una corrección atmosférica y eliminar cualquier tipo de ruido que hubiera podido distorsionar los resultados, posteriormente se creó mosaico de las imágenes para poder tener una sola información de la zona de estudio. Se delimitó la zona de estudio (lago Titicaca) para poder solamente

procesar ese espejo de agua con la finalidad de no permitir la intervención de otros espacios de agua (ríos, lagunas). Posteriormente se aplicó el SMA, supervisada.

B. Análisis de mezcla espectral (SMA).

Es un método físico sofisticado y ampliamente utilizado para distinguir los elementos que pueden formar una imagen satelital, como el cuerpo de agua, el bosque, el suelo y las construcciones.

El resultado espectral de un píxel es la suma de las respuestas espectrales de los elementos puros representados en él, cada uno de los cuales tiene una proporción de superficie. Supongamos que las coberturas A, B y C coexisten en un píxel, como se muestra en la Figura 4. El valor digital o la intensidad del píxel i en la banda espectral j se obtiene sumando los valores digitales (x_A , x_B y x_C) de las respectivas coberturas.

$$x_{ij} = 0,20x_A + 0,55x_B + 0,25x_C$$

Considerando que ocupa el 20% de la superficie representada por el píxel, B el 55% y C el 25%.

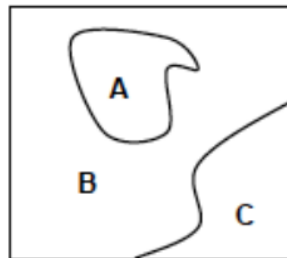


Figura 04: Esquematación de un píxel con tres coberturas: A, B y C.

$$X_{ij} = E \cdot F_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

El vector X_{ij} representa los valores de un píxel en una variedad de bandas espectrales, el vector fijo son las fracciones de los miembros puros y la matriz E contiene las signaturas de los miembros puros en una variedad de bandas, que se pueden obtener a partir de los valores medios o extremos de las muestras representativas de cada clase. ij representa el

error residual de ajuste correspondiente al ruido. Sakti y Tsuyuki (2015) y Ruiz (2016)

Expresar más:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{k1} & \cdots & e_{kL} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_L \end{pmatrix}$$

donde L es la cantidad de miembros puros y k es la cantidad de bandas espectrales que se tienen en cuenta. Si se establece un número de miembros puros completo:

$$\sum_{l=1}^L f_l = 1$$

que crea una ecuación adicional en caso de que la cantidad de bandas sea menor que la cantidad de miembros puros o clases a tener en cuenta. Es difícil definir en realidad los miembros puros, ya que no se puede estar seguro de haber apreciado todos los elementos que componen un paisaje específico. La limitación de que las fracciones sean positivas también puede ser un requisito adicional, $f_i \geq 0$.

Es crucial resolver el problema inverso, es decir, determinar las fracciones de los miembros puros que competen a cada píxel dados los valores espectrales de la imagen en las diferentes bandas, en una situación real. Así que, si no se toma en cuenta el concepto de error residual:

$$X_{ij} = E \cdot F_{ij} \Rightarrow F_{ij} = E^{-1} \cdot X_{ij}$$

Si el número de bandas espectrales, k, es mayor que el número de miembros puros considerados, L, el modelo se sobredimensiona y la matriz de miembros puros no puede cambiarse. Ruiz (2016). Su pseudoinversa se estima en este sentido, quedando:

$$F_{ij} = (E^T \cdot E)^{-1} \cdot E^T \cdot X_{ij}$$

Metodología para el objetivo específico O2: Comparación de la variación del análisis de mezcla espectral (SMA) multitemporal mediante la aplicación de análisis de

componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca, 2014 - 2023.

El Análisis de Componentes Principales tiene diversas aplicaciones, una de estas es en la teledetección para la detección de cambios en superficies. Es una herramienta útil para reducir la dimensionalidad de los datos y al mismo tiempo conservar información esencial para conjuntos de datos manipulados, indica que esa técnica se puede utilizar de un modo particular en aplicaciones multi temporales, ya que, luego de generar un archivo multitemporal y aplicar el ACP, la primera componente recoge la información común a las fechas y a partir de la segunda componente se entrega la información de cambio

El primer paso del PCA es la construcción de una matriz, $U(t)$, que contiene las historias temporales de todos datos de medición

$$U(t) = \begin{bmatrix} u_1(t_1) & u_2(t_1) & \cdots & u_M(t_1) \\ u_1(t_2) & u_2(t_2) & \cdots & u_M(t_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1(t_N) & u_2(t_N) & \cdots & u_M(t_N) \end{bmatrix},$$

donde M = Número total de coordenadas, N = Número total de años.

Tenga en cuenta que los datos de cada columna son las series temporales de eventos de medición de cada sensor individual. se deben normalizar las series temporales de cada columna o de cada sensor restando la valor medio dado por:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_i(t_j).$$

La matriz normalizada se puede escribir entonces como:

$$U'(t) = \begin{bmatrix} u_1(t_1) - \bar{u}_1 & u_2(t_1) - \bar{u}_2 & \cdots & u_M(t_1) - \bar{u}_M \\ u_1(t_2) - \bar{u}_1 & u_2(t_2) - \bar{u}_2 & \cdots & u_M(t_2) - \bar{u}_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_1(t_N) - \bar{u}_1 & u_2(t_N) - \bar{u}_2 & \cdots & u_M(t_N) - \bar{u}_M \end{bmatrix}.$$

Construir matriz de covarianzas de $M \times M$, definida como:

$$C = \frac{1}{M} U' T U'$$

Finalmente, Obtener los valores y vectores propios:

$$(C - \lambda_i I) \psi_i = 0,$$

Al aplicar el ACP se podrá detectar los cambios ocurridos en durante el 2014 - 2023.

Metodología para el objetivo específico O3: Cuantificación en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca, 2014 - 2023.

Para determinar la cantidad de cambios que se han producido, se utilizó el conteo de píxeles, que consiste en agrupar los píxeles de las imágenes satelitales, donde los píxeles con agua y los que son secos están clasificados por cero. Luego, se contaron los píxeles con agua y los que son secos se compararon entre años y se determinó los cambios en los cuerpos de agua de diferentes años.

Luego, se creó un mapa de cambio para el período (2014–2023), que calculó el área en km^2 por año y luego se restó los cambios durante el período de diez años.

3.4. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

Causa o variable independiente (VI): Imágenes multitemporales

Efecto o variable dependiente (VD): Cambios de agua

Tabla 02: Operacionalidad de Variables.

Variab les	Indicadores	Escala de Medición	Tipos de variables
(VI) Imágenes multitemporales	Imágenes captadas durante el 2014 y 2023	Multiespectral, píxeles (m)	Independiente
(VD) Cambios de agua	Superficie de agua	Área de superficie en (km ²)	Dependiente

3.5. DISEÑO ESTADÍSTICO

3.5.1. Para objetivo 01

El diseño estadístico que permitió diferenciar las zonas con agua y zonas de tierra fue el kappa y accuracy, son métodos que permiten medir la robustez del modelo sobre la clasificación de superficies:

Kappa.- Es un método multivariado discreto de uso en la evaluación de la precisión. En el proceso de clasificación, donde los píxeles se asignan aleatoriamente a clases se producirá un valor porcentual correcto. La medida Kappa resultante compensa la concordancia aleatoria en la clasificación y proporciona una medida de cuánto mejor se desempeñó la clasificación en comparación con la probabilidad de asignación aleatoria de píxeles a sus categorías correctas (Prasad, 2022).

\hat{K} = en teoría es expresado de la siguiente manera

$$\hat{K} = \frac{\text{observed accuracy} - \text{chance agreement}}{1 - \text{chance agreement}}$$

sin embargo se puede calcular:

$$\widehat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}$$

Donde:

r = número de filas en matriz de error.

x_{ii}= número de observaciones de filas i y columnas i.

X_{i+} = total de observaciones en fila i.

X_{+i}= total de observaciones en columna i.

N = número total de observaciones incluidas en la matriz.

Tabla 03: valores de interpretación de la matriz Kappa

Kappa	Interpretación
0 - 0.2	Infima concordancia
0.2 - 0.4	escasa concordancia
0.4 - 0.6	moderada concordancia
0.6 - 0.8	buena concordancia
0.8 - 1.0	muy buena concordancia

Fuente: (Vindell, 2021).

Posteriormente se aplicó el Análisis de componentes principales para detectar los años que presentaron variación entre los años de estudio.

3.5.2. Para el objetivo 02

para poder medir la variación del sma multitemporal mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago titicaca, 2014 - 2023, se aplicó la Prueba de **Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)**: esta prueba es la medida de adecuación muestral donde indica si los datos son adecuados para un análisis de componentes principales. Un valor de KMO cercano a 1 indica que el ACP es

apropiado, mientras que un valor inferior a 0.5 sugiere que el ACP puede no ser adecuado (Guadarrama, 2020)

Tabla 04: valores de interpretación de KMO

Valor de KMO	Nivel de Adecuación
0.90 a 1.00	Excelente
0.80 a 0.89	Muy Bueno
0.70 a 0.79	Bueno
0.60 a 0.69	Aceptable
0.50 a 0.59	Regular
menos de 0.50	No adecuado (insuficiente)

Fuente: (Guadarrama, 2020)

3.5.3. Para objetivo 03

Para poder medir la tendencia de los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca, 2014 - 2023. Se aplicará la prueba de correlación de Pearson, es una prueba que mide la relación estadística que existe entre dos variables continuas y que estas variables siempre cumplan los parámetros de normalidad. con el fin de medir la asociación entre los elementos (Ortega, 2019).

Tabla 05: valores de interpretación de Karl Pearson

Valor R	Fuerza de correlación
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0.9 a -0.99	Correlación negativa muy alta
-0.7 a - 0.89	Correlación negativa alta
-0.4 a -0.69	Correlación negativa moderada
-0.2 a -0.39	Correlación negativa baja
-0.01 a -0.19	Correlación negativa muy baja
0	Correlación nula
0.01 a 0.19	Correlación positiva muy baja
0.2 a 0.39	Correlación positiva baja
0.4 a 0.69	Correlación positiva moderada
0.7 a 0.89	Correlación positiva alta
0.9 a 0.99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

Fuente:(Kuckartz et al., 2013)

CAPÍTULO IV

EXPOSICION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. DIFERENCIACIÓN DE ZONAS CON AGUA Y ZONAS DE TIERRA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE MEZCLA ESPECTRAL (SMA) UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO TITICACA BAHÍA PUNO, 2014 - 2023.

Los resultados obtenidos se presentan para este objetivo en este estudio donde se aplicó el Análisis de Mezcla Espectral (SMA) para poder clasificar diferentes tipos de coberturas, la principal cobertura de estudio fue el agua del lago Titicaca Bahía de Puno.

Tabla 06: Valores de Kappa y Accuracy para la clasificación supervisada de SMA del lago Titicaca Bahía de Puno.

Modelo	Kappa	Accuracy
SMA 2014	0.973	96.9
SMA 2015	0.983	99.1
SMA 2016	0.979	99.0
SMA 2017	0.917	95.8
SMA 2018	0.977	98.9
SMA 2019	0.971	98.6
SMA 2020	0.977	98.9
SMA 2021	0.989	99.4
SMA 2022	0.983	99.1
SMA 2023	0.805	89.2
PROMEDIO	0.955	97.5

Según la tabla 06 se realizó la clasificación con el modelo Análisis de mezcla espectral (SMA) para el lago Titicaca bahía de Puno un coeficiente Kappa promedio de 0.96 los que indica que el modelo presentó una muy buena concordancia en la clasificación de coberturas y un accuracy promedio de 97%. El año que presentó una mejor clasificación supervisada fue el 2021 con Kappa de 0.989 y accuracy de 99.4%; y un mínimo Kappa 0.80, accuracy de 89.2%. es así que el método fue preciso en la clasificación.

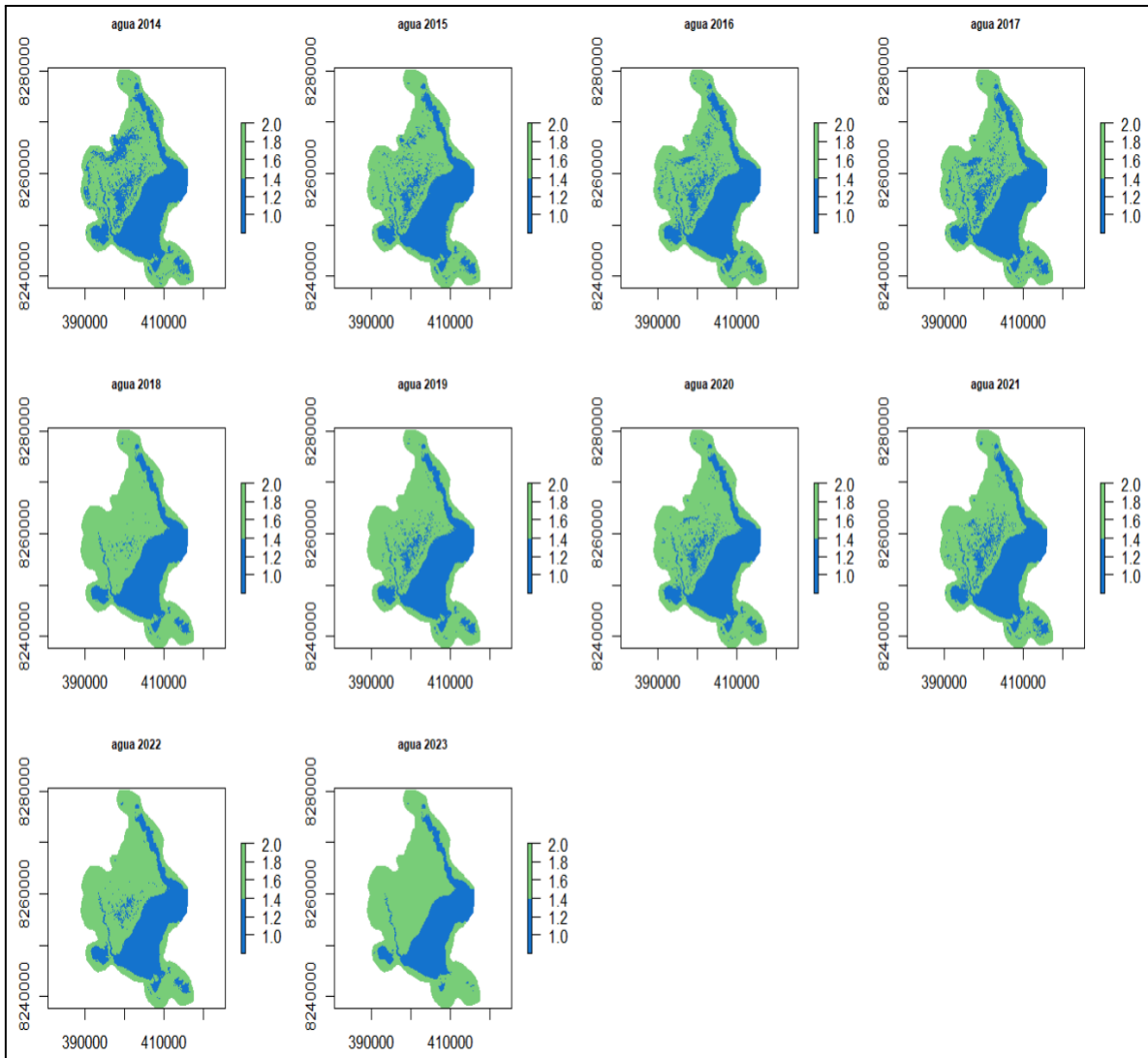


Figura 05: Clasificación supervisada mediante el SMA para el periodo 2014 - 2023.

En la Figura 05 se presenta imágenes obtenidas de la clasificación con SMA para cada año donde se va observando la clasificación de cobertura de agua y otras coberturas tales como totoral, suelo desnudo y urbano los cuales fueron considerados como otras coberturas debido a que el interés del estudio fue el agua. los valores que tomó el agua fue de 1 a 1.4 y sobre estos valores son considerados como otros.

Así mismo menciona (Mancilla, 2021) que los mayores valores de Kappa y accuracy es más preciso el modelo donde en la laguna Aculeo encontró valores de 0.92 y 96.2% respectivamente, concordando con nuestros resultados. así mismo para la laguna Peñuelas sus valores fueron por encima de 0.8. Así también, Salih, (2023) en su estudio con la aplicación de SMA los mapas finales de fracciones de cobertura urbanas el

Accuracy general varió del 95% al 100% presentado buenas clasificaciones con el modelo.

No obstante Kathirvelu et al., (2023) con la aplicación de otro modelo como el Random forest sus resultados experimentales indican que el su clasificador propuesto alcanzó una precisión del usuario del 99,9945% para el área de agua y una precisión del productor del 99,9675% para el área modificada, donde da a entender que el accuracy es un indicador de una buena precisión en la clasificación de coberturas.

Medina Mena, (2000) menciona en sus resultados de este estudio han clasificado a la imagen y al aplicar el ACP presentó una exactitud global de 86.90 y 90.47, y un índice Kappa de 0.60 y 0.72 respectivamente. lo que presentó similar resultado con este estudio.

4.2. COMPARACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL SMA MULTITEMPORAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (ACP) UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO TITICACA BAHÍA PUNO, 2014 - 2023

Se aplicó el Análisis de componentes principales para comparar la variación del SMA encontrando los siguientes resultados.

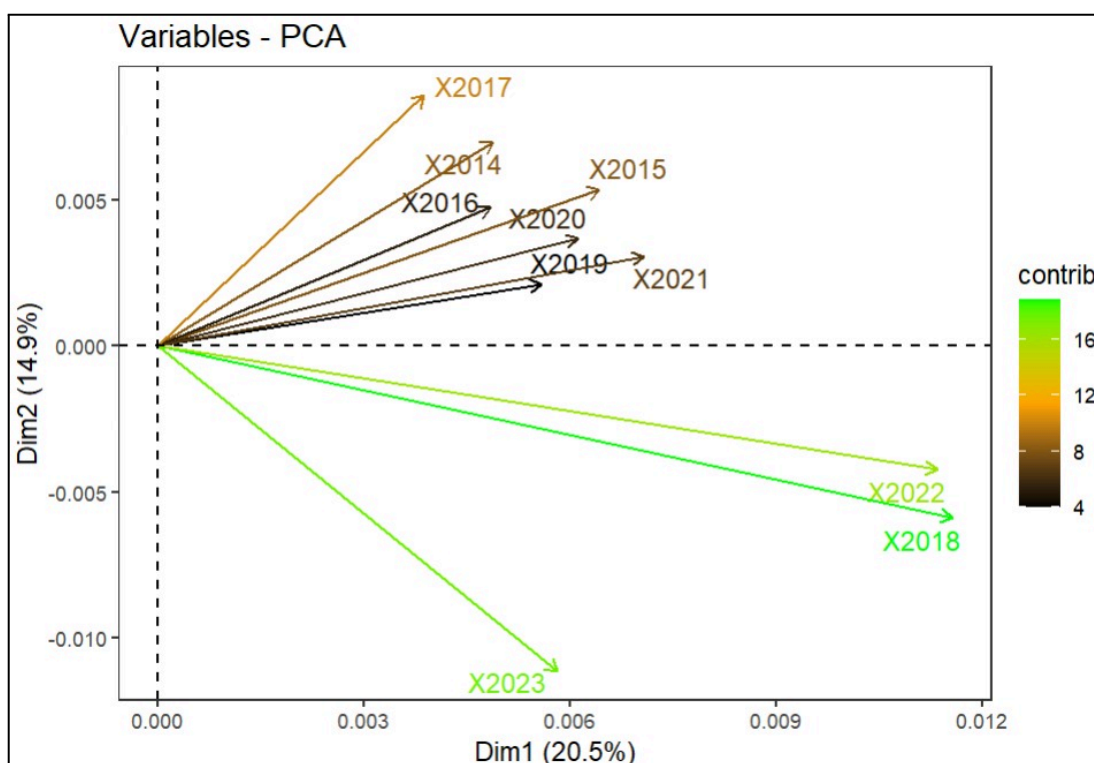


Figura 06: Biplot de ACP del 2014 a 2023 de lago Titicaca bahía Puno

En la figura 06, se muestra el biplot del análisis de componentes principales 1 y 2 para los años desde 2014 a 2023. La componente principal 1 mostró variaciones entre los años 2017-2023 y 2014-2023, también se observó diferencias significativas entre los años 2023-2022 y 2023-2018. Sin embargo, no se encontró variación significativa entre los años 2022 y 2018. Así mismo las diferencias entre los años 2014, 2016, 2020, 2015, 2019 y 2021 fueron mínimas. solamente el año 2023 presentó una gran variación frente a los años mencionados que se encuentran dirigidas hacia el componente 2.

Así también, (Mancilla, 2021) pudo encontrar cambios de agua de la laguna Aculeo y lago Peñuelas aplicando el biplot del Análisis de componentes principales para el periodo 2010 - 2015 y 2010 - 2019 respectivamente. así mismo, Ferrero et al., (2002) menciona que la aplicación de ACP para multitemporales es un buen método que permite detectar cambios.

4.3. CUANTIFICACIÓN EN KILÓMETROS CUADRADOS LOS CAMBIOS DE SUPERFICIE DE AGUA UTILIZANDO IMÁGENES MULTITEMPORALES DEL LAGO TITICACA BAHÍA PUNO, 2014 - 2023.

Se cuantifican los resultados obtenidos en kilómetros cuadrados los cambios ocurridos durante el periodo de diez años, y se encontró una fuerte disminución de la cobertura de agua durante el periodo de estudio. en la tabla 03 se tienen los resultados.

Tabla 07: Cambios de superficie de agua del lago Titicaca Bahía de Puno periodo 2014 - 2023.

Año	Área (km²)	Variación de superficie (km²)	Variación acumulada (km²)
2014	286.33	0.00	0.00
2015	254.45	-31.88	-31.88

2016	262.78	8.33	-23.55
2017	254.53	-8.25	-31.80
2018	206.32	-48.21	-80.01
2019	239.80	33.48	-46.53
2020	241.68	1.87	-44.65
2021	252.33	10.65	-34.00
2022	213.65	-38.68	-72.68
2023	180.54	-33.10	-105.78
Total	2392.40	-105.78	-470.89

Según la tabla 03 en 2014 se ha tenido una superficie de agua de 286.33 km², para el 2015 ha disminuido -31.88 km², contribuyendo para el 2016 con 8.33 km² llegando a cubrir una superficie de 254.53 km². Sin embargo, para el 2018 el agua disminuyó -48.21 km² una superficie de 206.32 km². para el año 2019 la contribución de los afluentes, adicionado con las precipitaciones pluviales aumentó a 239.80 km², no obstante para el 2022 la superficie de agua cayó a 2013.65 km². Más aún para el 2023 la superficie disminuyó a 180.54 km² (-33.10 km²), durante ese periodo de diez años el agua perdió una superficie de agua acumulado de -105.78 km² para el lago Titicaca bahía de Puno.

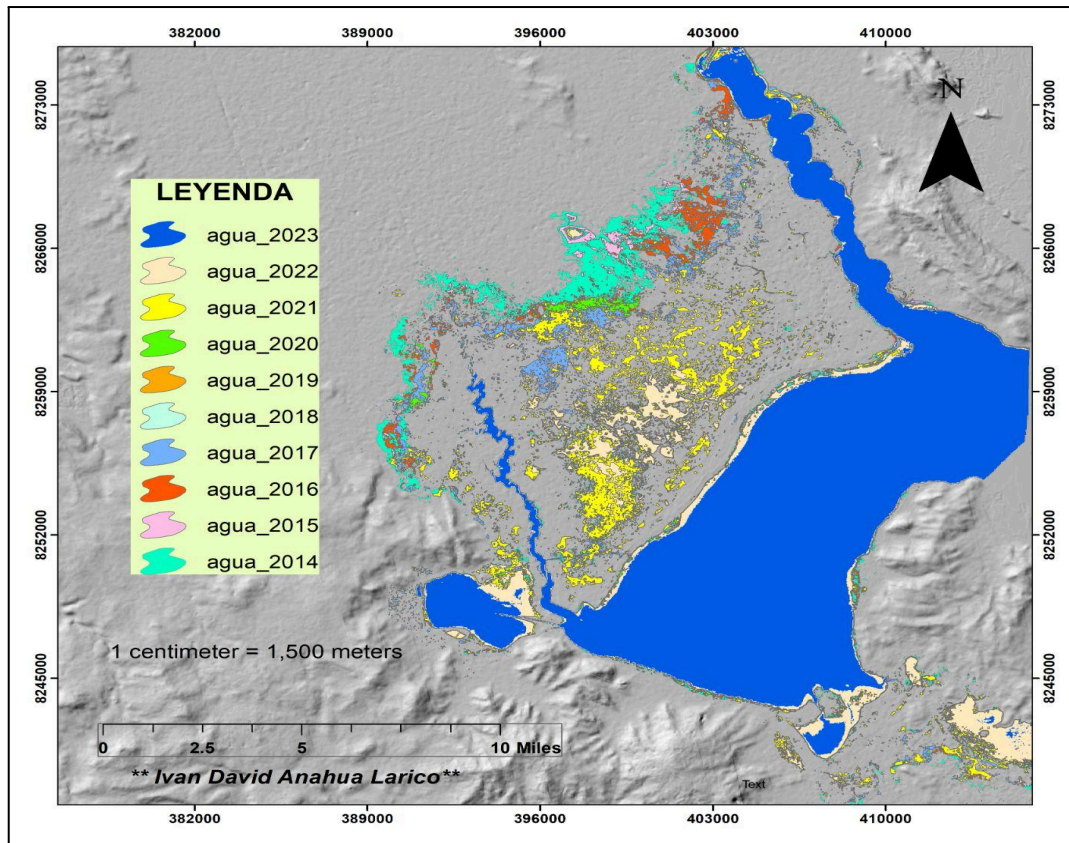


Figura 07: Mapa de cambios de agua del lago Titicaca bahía de Puno durante el periodo 2014 - 2023.

En la figura 07 se puede observar los cambios de disminución de superficie de agua ocurridos durante el periodo de diez años, lo que conlleva a un conjunto de efectos negativos sobre la biodiversidad que habita en ese espacio, incluido la acuicultura, pesca, turismo y otras actividades de desarrollo humano.

Así mismo en el lago Sattal y Naukuchiatal en India, sus áreas de superficie han disminuido en el periodo de 2001 al 2018 un área de $-0,00087 \text{ km}^2 / \text{año}$ y $-0,00056 \text{ km}^2 / \text{año}$ (Deoli et al., 2021), no obstante, en la laguna aculeo y la laguna peñuelas el comportamiento de sus superficies de agua presentaron similar comportamiento sufriendo reducción acumulado de sus aguas en -5.93 km^2 y -2.67 km^2 en el periodo 2010 - 2015 y 2010 - 2020 respectivamente (Mancilla, 2021), del mismo modo en el lago Burullus de Egipto en el período 1972-2015 disminuyó 212.58 km^2 de superficie que representa un aproximadamente el 49 % (Mohsen et al., 2018).

Por otra parte, las aguas superficiales en partes de la cuenca superior del río Krishna, India; también habían disminuido 48.75 km² en periodo de 1999 - 2016 (Ashtekar et al., 2019), estos resultados presentaron similares comportamientos con los resultados encontrados en el lago Titicaca bahía de Puno. esta ocurrencia de los cambios y/o fluctuación puede estar relacionado a la variabilidad de la precipitación pluvial (Nsubuga et al., 2017). otro factor influyente es el cambio climático puede generar cambios en la temperatura superficial del agua, cambios en la evaporación y mezclas de agua (Woolway et al., 2020).

4.4. PROCESO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS

Regla de decisiones :

Kappa= 0.8-1, se rechaza la HN (Se acepta la HA).

Kappa= > 0 -0.2 , se acepta la HN (Se rechaza la HA).

Indicando que la hipótesis nula está indicada con (HN) y la hipótesis alterna está indicada con (HA), donde también se indica que el nivel de significancia es Kappa buena concordancia en la clasificación con un nivel de confianza al 95%.

4.4.1. Prueba de hipótesis para el objetivo 01.

HN: No existe diferencia en zonas con agua y zonas de tierra detectables mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.

HA: Existe diferencia en zonas con agua y zonas de tierra detectables mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.

Resultado de la prueba de hipótesis

En la tabla 02 se puede observar que el valor de Kappa es de 0.95 y accuracy de 0.97, el valor de kappa se ubicó dentro de 0.8 - 1, lo que da a entender que existió una muy buena concordancia entre los puntos de entrenamiento y los píxeles clasificados por el modelo.

Hipótesis alterna: Si existe diferencia en zonas con agua y zonas de tierra detectables mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.

4.4.2. Prueba de hipótesis para el objetivo 02.

HN: No existe variación detectable en el análisis de mezcla espectral (SMA) mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.

HA: existe variación detectable en el análisis de mezcla espectral (SMA) mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.

Resultado de la prueba de hipótesis

El resultado encontrado en la prueba de el valor de Kaiser Meyer Olkin (KMO) fue de 0.77 este valor es cercano a 1 e indica que el ACP fue bueno según la tabla 01 y se acepta la hipótesis alterna.

Hipótesis alterna: existe variación detectable en el análisis de mezcla espectral (SMA) mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.

4.4.3. Prueba de hipótesis para el objetivo 03.

HN: El lago Titicaca bahía Puno no presenta en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales, 2014 - 2023

HA: El lago Titicaca bahía Puno presenta en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales, 2014 - 2023

Resultado de la prueba de hipótesis

el resultado de la prueba de Pearson encontró el valor de $t = -3.4003$, $df = 8$, $P\text{-value} = 0.00935$ y $Cor = -0.77$ este valor muestra una correlación negativa alta, en ese sentido se acepta la hipótesis alterna (fig. 08).

Hipótesis Alterna: El lago Titicaca bahía Puno presenta en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales, 2014 - 2023

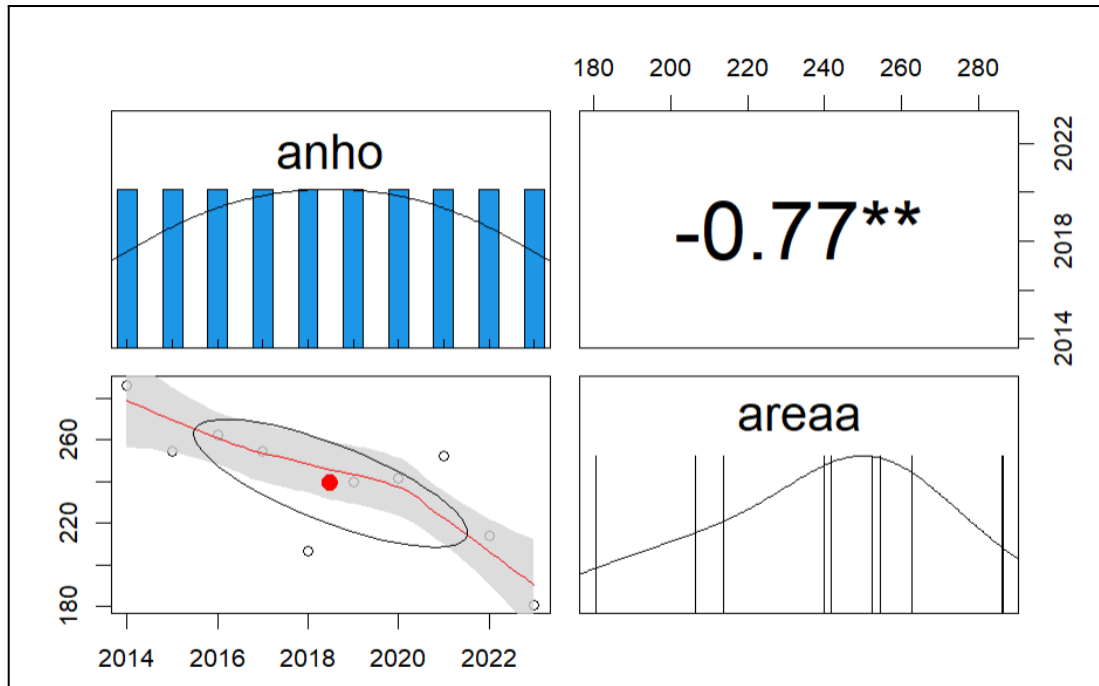


Figura 08: Resultados de correlación Pearson

CONCLUSIONES

PRIMERA: Se diferenciaron las zonas con agua y zonas de tierra seca mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno para el periodo 2014 - 2023, encontrándose una matriz Kappa de 0.95 y accuracy de 0.97, lo que muestra que el modelo SMA presentó una buena clasificación para la cobertura de agua y suelos.

SEGUNDA: se comparó la variación del SMA multitemporal mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca Bahía Puno para el periodo 2014 - 2023 donde el año 2014 a 2023 presentó una alta variación de cobertura de agua donde el valor de Kaiser Meyer Olkin (KMO) para ACP fue de 0.77, con una buena diferenciación de la variación de agua.

TERCERA: Durante el periodo de diez años se cuantificó -105.78 kilómetros cuadrados acumulados perdidos para el lago Titicaca Bahía Puno, 2014 - 2023. La correlación de Pearson mostró un valor de -0.77, este valor muestra una correlación negativa alta evidenciando una tendencia de disminución de cobertura de agua.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda realizar estudios con otros modelos de clasificación supervisada como Random forest, support vector machine, redes neuronales, etc. para robustecer los cambios de cobertura de agua, además de presentar un buen equipo computacional para realizar procesos de modelado en áreas de estudio de mayor dimensión.

SEGUNDA: A las instituciones involucradas con la gestión de recursos hídricos, se recomienda realizar estudios y fortalecer las capacidades de gestión de este recurso, además de promover y poner mayor énfasis en la educación ambiental.

TERCERO: A la población que vive en la Bahía de Puno del lago Titicaca, evitar las quemadas de cobertura vegetal (*Schoenoplectus totona*) para evitar la evapotranspiración de superficie de agua del lago Titicaca, además afecta a la fauna silvestre que anida en este cuerpo de agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Aquae, F. (s. f.). *¿Cómo se distribuye el agua dulce y salada?*
- Ashtekar, A. S., Mohammed-Aslam, M. A., & Moosvi, A. R. (2019). Utility of Normalized Difference Water Index and GIS for Mapping Surface Water Dynamics in Sub-Upper Krishna Basin. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(8), 1431-1442. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01013-6>
- Bates, B., Kundzewicz, Z. W., Palutikof, J., & Wu, S. (2008). *El Cambio Climático y el Agua*. <https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf>
- Calcina-Flores, K. D. (2021). *Evaluar la pérdida de espejo de agua y la biomasa en la Bahía Interior de Puno durante el periodo 1984 al 2019* [Universidad Privada San Carlos]. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC%20S.A.C./208>
- Campaña-Olaya, J., & Gines-Tafur, E. (2021). *Análisis multitemporal del NDDI, comparación con el NDWI para determinar la sequía en la Reserva Nacional de Tumbes, Perú, 1986—2019*. 18(4), 389-395.
- Deoli, V., Kumar, D., Kumar, M., Kuriqi, A., & Elbeltagi, A. (2021). Water spread mapping of multiple lakes using remote sensing and satellite data. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(21), 2213. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08597-9>
- Fernandez, A. (2012). *El agua: Un recurso esencial*. 11(3), 147-170.
- Ferrero, S. B., Palacio, M. G., & Campanella, O. R. (2002). *Análisis de componentes principales en teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación*. 17, 43-54.
- González, A. C. (2021). *Análisis multitemporal de los lagos de Michoacán mediante teledetección* [Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4241574>
- Guadarrama, J. R. (2020, enero 1). *Prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)*. <https://www.r-data-scientist.com/ru/blog/statistical-tests/kaiser-meyer-olkin-test/>
- Karimi, N., & Namdari, S. (2019). Estimation of severity and extent of desertification in Iran using Landsat satellite images and spectral mixture analyses methods between

- 1984 and 2015. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(2).
<https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20203488510>
- Kathirvelu, K., Yesudhas, A. V. P., & Ramanathan, S. (2023). Spectral unmixing based random forest classifier for detecting surface water changes in multitemporal pansharpened Landsat image. *Expert Systems with Applications*, 224, 120072.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120072>
- Kuckartz, U., Rädiker, S., Ebert, T., & Schehl, J. (2013). *Statistik: Eine verständliche Einführung* (2., überarb. Aufl. 2013 Edition). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Mancilla, N. (2021). *Detección de cambios en cuerpos de agua mediante imágenes satelitales multitemporales*. Universidad de Valparaíso.
- Medina Mena, J. E. (2000). *Detección de cambios de coberturas de uso del suelo a través de imágenes satelitales Landsat TM en la IX Región Chile*. [Universidad Católica de Temuco]. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/18432>
- Mohsen, A., Elshemy, M., & Zeidan, B. A. (2018). Change detection for Lake Burullus, Egypt using remote sensing and GIS approaches. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(31), 30763-30771.
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-8167-y>
- Nsubuga, F. . W. N., Botai, J. O., Olwoch, J. M., Rautenbach, C. J. deW, Kalumba, A. M., Tsela, P., Adeola, A. M., Sentongo, A. A., & Mearns, K. F. (2017). Detecting changes in surface water area of Lake Kyoga sub-basin using remotely sensed imagery in a changing climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 127, 327-337.
<https://doi.org/10.1007/s00704-015-1637-1>
- Ocola Salazar, J. J., & Laqui Vilca, W. F. (2017). *Fuentes Contaminantes en la Cuenca del Lago Titicaca: Un aporte al conocimiento de las causas que amenazan la calidad del agua del maravilloso lago Titicaca*. (Primera).
- Ortega, C. (2019, mayo 28). ¿Qué es el coeficiente de correlación de Pearson? *QuestionPro*.
<https://www.questionpro.com/blog/es/coeficiente-de-correlacion-de-pearson/>

- Prasad, S. (2022). Clasificación de Accuracy assessment. *Digital Image Processing*, 8.
- Rudorff, C., Novo, E., & Galvao, L. (2006). Spectral Mixture Analysis of Inland Tropical Amazon Floodplain Waters Using EO-1 Hyperion. *2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, 128-133. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.38>
- Salih, A. (2023). Spectral Mixture Analysis (SMA) Model for Extracting Urban Fractions from Landsat and Sentinel-2A Images in the Al-Ahsa Oasis, Eastern Region of Saudi Arabia. *Land*, 12(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/land12101842>
- Sandoval, S., Escobar-Flores, J. G., & Sánchez-Ortíz, E. (2020). *Inventario de cuerpos de agua de la Sierra Madre Occidental (México) usando SIG y percepción remota*. 102. <https://doi.org/dx.doi.org/10.14350/rig.59975>
- Seeley, M. M., Vaughn, N. R., Shanks, B. L., Martin, R. E., König, M., & Asner, G. P. (2023). *Classifying a Highly Polymorphic Tree Species across Landscapes Using Airborne Imaging Spectroscopy*. 15, 4365. <https://doi.org/10.3390/rs15184365>
- Tolba, M. K. (1992). Cambios climáticos. En M. K. Tolba (Ed.), *Salvemos El Planeta: Problemas y Esperanzas* (pp. 23-32). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2286-3_3
- Vindell, J. J. (2021). *Kappa de Cohen en R*. Rpubs. <https://www.rpubs.com/VINDELL2981/kappa>
- Woolway, R. I., Kraemer, B. M., Lenters, J. D., Merchant, C. J., O'Reilly, C. M., & Sharma, S. (2020). Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8), 388-403. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>



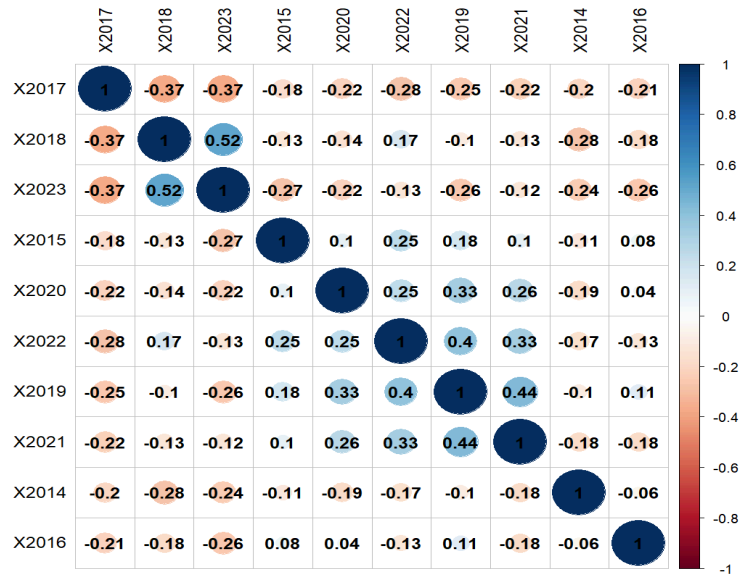
ANEXOS

Anexo 01: Matriz de consistencia.

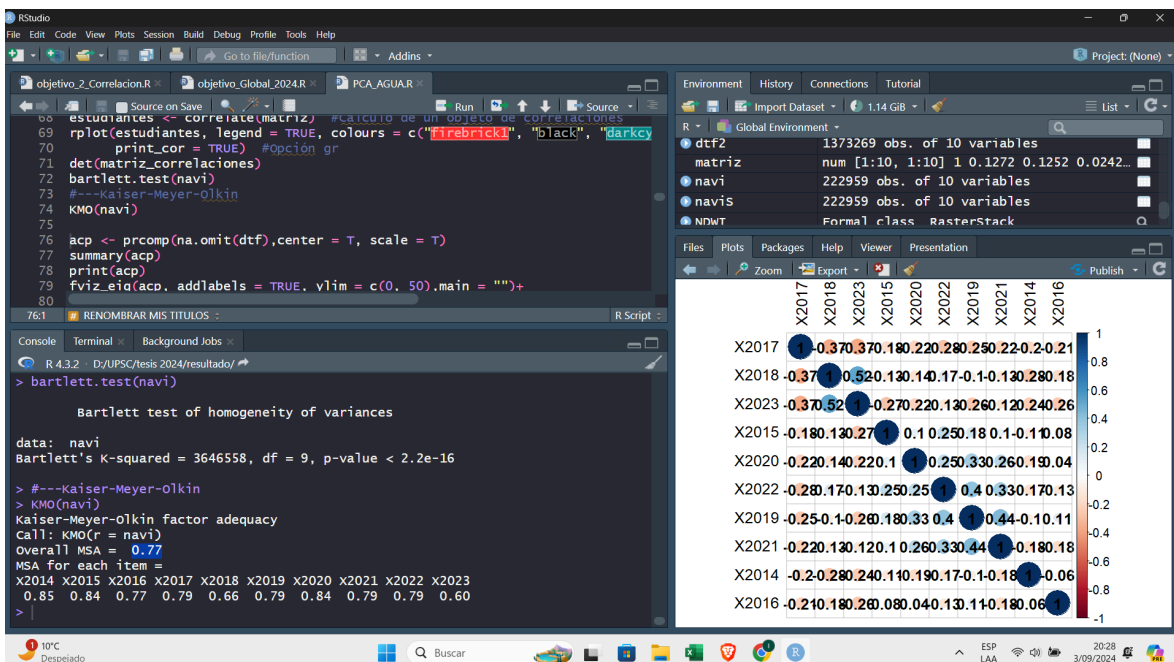
“Detección de cambios de agua con análisis de mezcla espectral utilizando imágenes multitemporales del Lago Titicaca, 2014 - 2023”

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables	Método	Estadística
¿Los cambios de agua serán detectables a partir de análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023?.	Analizar los cambios de agua a partir del análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.	Los cambios de agua a partir análisis de mezcla espectral (SMA) son detectables utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023	Variable dependiente - Cambios de agua	- Descriptivo - Retrospectivo - Correlacional	- Análisis de mezcla espectral (SMA) - Análisis de componentes principales (ACP) - Correlación de Pearson
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable independiente		
¿ La diferencia entre la zona con agua y la zona de tierra serán detectables mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023?.	Diferenciar zonas con agua y zonas de tierra mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.	Existe diferencia en zonas con agua y zonas de tierra detectables mediante el análisis de mezcla espectral (SMA) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.	- Imágenes multitemporales		
¿Existirá variación del análisis de mezcla espectral (SMA) mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023?.	Comparar la variación del análisis de mezcla espectral (SMA) mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.	Existe variación detectable en el análisis de mezcla espectral (SMA) mediante la aplicación de análisis de componentes principales (ACP) utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.			
¿El lago Titicaca presentará en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023?.	Cuantificar en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales del lago Titicaca bahía Puno, 2014 - 2023.	El lago Titicaca bahía Puno presenta en kilómetros cuadrados los cambios de superficie de agua utilizando imágenes multitemporales, 2014 - 2023			

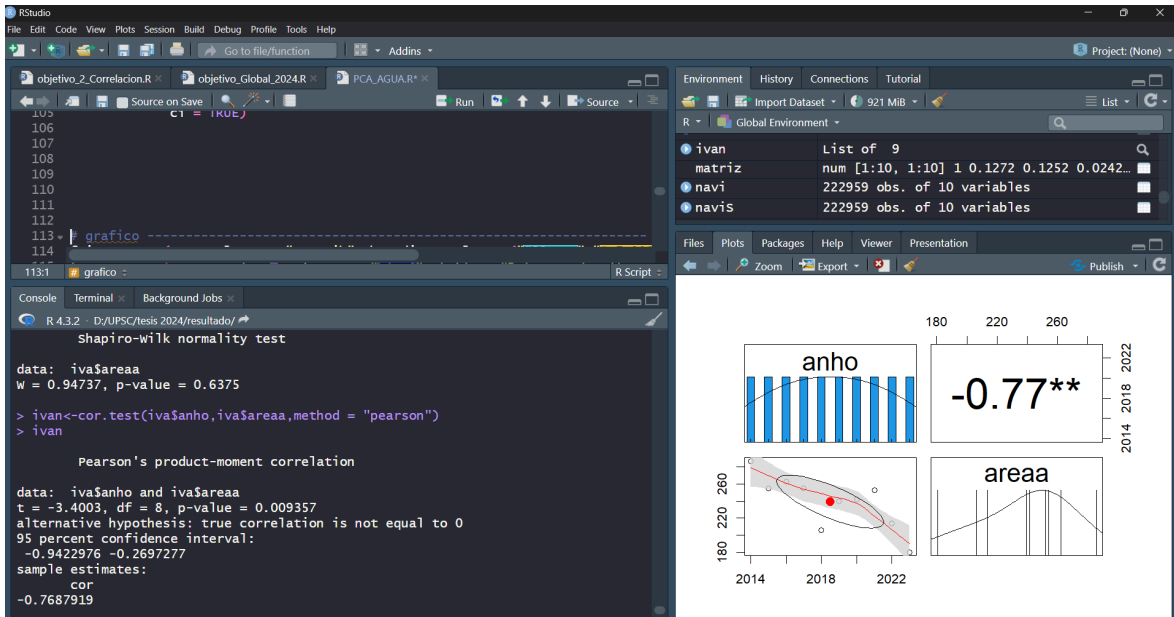
Anexo 02: Matriz de Correlación de Pearson



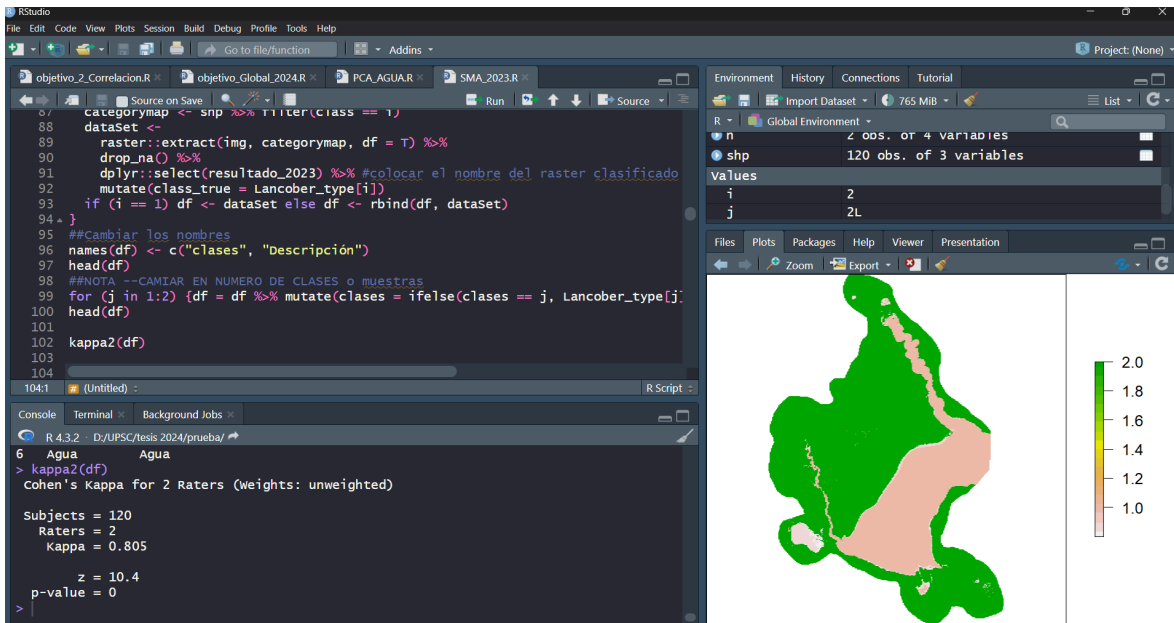
Anexo 03: Proceso de obtención de KMO y Bartlett para ACP



Anexo 04: Proceso de Obtención de la Correlación de Pearson y su prueba de normalidad



Anexo 05: Proceso de obtención de índice Kappa en Rstudio



Anexo 06: Ploteo de cobertura de agua clasificado por SMA para 2023

