

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO
PARA LA EVALUACIÓN DE BOFEDALES POR
MEDIO DE LA OBSERVACIÓN TERRESTRE**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

AUTOR

Fabrizio Josue Villar Acevedo (ORCID: 0009-0000-5926-9811)

ASESOR(ES)

Pedro Rau Lavado (ORCID: 0000-0002-1004-6729)

Lima – Perú

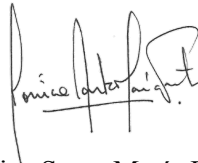
2023

DECLARACIÓN JURADA

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster identificada con DNI No 18226712 en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis denominada “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA LA EVALUACIÓN DE BOFEDALES POR MEDIO DE LA OBSERVACIÓN TERRESTRE” ha sido elaborada por el señor Fabrizio Josue Villar Acevedo, con la asesoría de Pedro Christopher Rau Lavado, identificado con el DNI 41900881, y que se presenta para obtener el grado de Ingeniero ambiental, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 0%.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra. Mónica Santa María Fuster
Directora de Investigación

En Barranco, el 13 de setiembre de 2023

Dedicatoria:

A mis padres, abuelita y hermano quienes me han acompañado en toda mi vida, y me han guiado a convertirme en el buen profesional y persona que soy.

Agradecimientos:

A mi asesor Pedro Rau, por enseñarme del mundo de la investigación y su buena dedicación al asesorarme en la tesis y demás proyectos.

A mis amistades por sus buenos consejos, y en especial a los que hicieron posible el desarrollo del proyecto.

La presente tesis forma parte de un proyecto de investigación financiado con el concurso Premio Nacional Cultura del Agua 2021 - H2O, con la organización de la ANA y Forest Trends en representación del proyecto INSH.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO I.....	18
REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA.....	18
1.1. Evaluación de bofedales en proyectos que utilizan la EO.....	18
1.2. Uso de <i>Google Earth Engine</i> en investigaciones de la EO	19
1.3. Índices multiespectrales utilizados para el estudio de bofedales en Perú.....	20
1.4. Uso de la teledetección y reanálisis climático en la modelación hidrológica para la obtención de características climáticas.....	21
1.5. Evaluación de la humedad del suelo a través de SIG	22
CAPÍTULO II.....	24
MARCO TEÓRICO	24
2.1. Sistemas de monitoreo ambiental	24
2.1.1. Medición de parámetros ambientales	24
2.1.2. Colección de la muestra y parámetro.....	24
2.1.3. Propiedades espaciales y temporales	25
2.1.4. Unidades representativas	25
2.1.5. Plan de muestro ambiental.....	25
2.2. Sistemas de información geográfica (SIG).....	26
2.2.1. Recopilación de datos de forma aérea	27

2.3.	Sensoramiento remoto para el monitoreo ambiental	27
2.3.1.	Principios físicos.....	27
2.3.2.	Estimación de variables biofísicas con teledetección	28
2.4.	Infraestructura natural (IN).....	29
2.4.1.	Brechas de conocimiento de los efectos de las intervenciones en IN.....	30
2.5.	Servicios ecosistémicos	30
2.5.1.	Servicios ecosistémicos hídricos	31
2.6.	Modelación del ciclo hidrológico.....	33
2.7.	Datos generados a través del reanálisis y modelado hidroclimático	34
2.8.	Evaluación de desempeño en modelos hidrológicos	35
CAPÍTULO III		37
MARCO METODOLÓGICO		37
3.1.	Caracterización de la investigación	37
3.2.	Procesos de la investigación	38
3.3.	Estructura del marco metodológico.....	38
3.3.1.	Área de estudio	38
3.3.2.	Caracterización general de la microcuenca.....	41
3.3.3.	Monitoreo de los bofedales a escala de cuenca mediante SIG	50
3.3.4.	Monitoreo de variables hidrológicas y biofísicas en la subcuenca Aycagranga...	52
3.3.5.	Indicadores del sistema de monitoreo desarrollado	54
CAPÍTULO IV		58
RESULTADOS		58
4.1.	Caracterización de variables biofísicas.....	58
4.1.1.	Características hidrológicas	58

4.1.2.	Características climáticas.....	60
4.1.3.	Características edáficas y vegetativas.....	66
4.2.	Monitoreo de bofedales a escala cuenca mediante SIG	70
4.3.	Monitoreo de variables ambientales en Aycagranga.....	72
4.4.	Evaluación de indicadores del sistema de monitoreo.....	76
	CONCLUSIONES.....	83
	RECOMENDACIONES	85
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	ANEXOS	94

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Regiones del espectro electromagnético utilizadas en monitoreo ambiental ..	28
Tabla 2.2. División de los tipos de índices derivados de imágenes satelitales	29
Tabla 2.3. Formulación de indicadores para series climáticas.....	36
Tabla 2.4 Criterios de aceptabilidad de simulaciones basadas en su desempeño.....	36
Tabla 3.1. Recursos de libre acceso para la caracterización de la microcuenca Yuracmayo	42
Tabla 3.2. Descripción de la significancia del test de Mann-Kendall	46
Tabla 3.3. Descripción del producto SMAP.....	51
Tabla 3.4. Indicadores propuestos del sistema de monitoreo	55
Tabla 4.1. Características hidrológicas en la microcuenca Yuracmayo	58
Tabla 4.2. Tendencias de las características climáticas	65
Tabla 4.3. Indicadores de la situación actual de los bofedales en Aycagranga	75

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Combinando capas de datos en un Sistema de Información Geográfica	26
Figura 2.2. Diagrama del espectro electromagnético	28
Figura 2.3. Marco para vincular los ecosistemas con el bienestar humano	31
Figura 2.4. Entradas y salidas de balance hídrico para la protección y restauración de humedales altoandinos	33
Figura 2.5. Esquema de los componentes claves en la producción del conjunto de datos de reanálisis de descarga de ríos GloFAS-ERA5	35
Figura 3.1. Diagrama de flujo de la tesis	38
Figura 3.2. Área de estudio de la investigación	39
Figura 3.3. Productos grillados utilizados en la investigación.....	41
Figura 3.4. Algoritmo utilizado para el cálculo de extensión de bofedales	51
Figura 3.5. Componentes del infiltrómetro minidisco	54
Figura 4.1. Balance hidrológico medio en Yuracmayo	59
Figura 4.2. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes en Yuracmayo	60
Figura 4.3. Correlación entre la precipitación estación Casapalca vs PISCOp (1988 – 2016).	61
Figura 4.4. Correlación entre la temperatura estación Matucana vs PISCOt (1984 – 2015)	61
Figura 4.5. Correlación entre la evapotranspiración potencial Hargreaves-Samani vs PISCOeo (1984 – 2015).....	62
Figura 4.6. Series de tiempo de (a) precipitación, (b) evapotranspiración de referencia, (c) temperatura y (d) caudal naturalizado.....	64

Figura 4.7. a) Mapa de susceptibilidad a movimientos de masas y áreas degradadas b) Mapa de zonificación de zonas de tratamiento especial	67
Figura 4.8. a) Componentes Geológicos de la microcuenca Yuracmayo.	68
Figura 4.9. Componentes Hidrogeológicos de la microcuenca Yuracmayo.....	69
Figura 4.10. Series de tiempo de humedad del suelo subsuperficial (susm) y humedad del suelo superficial (ssm):	71
Figura 4.11. Series de tiempo de extensión de bofedales en Yuracmayo y Aycagrangea conjunto a la precipitación acumulada.....	72
Figura 4.12. Serie mensual de balance hidrológico y (b) serie interanual de balance hidrológico	73
Figura 4.13. Mapa de puntos de monitoreo en la investigación	74
Figura 4.14. (a) Serie mensual de balance hidrológico (BH) y (b) serie interanual de balance hidrológico.....	76
Figura 4.15. Serie interanual del SINDX.....	77
Figura 4.16. (a) Serie mensual de RR y (b) serie interanual de RR. Ambas series con datos del caudal naturalizado	78
Figura 4.17. Serie estacional (1984 – 2014) del volumen de caudal promedio y el volumen de lluvias mensual promedio	79
Figura 4.18. Serie interanual de IRH	80
Figura 4.19. Serie interanual de R2FDC.....	81

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Código en R: Extracción de P/ Tmax. /Tmín. del producto PISCO	95
Anexo 2: Código en GEE: Extracción de ETP	96
Anexo 3: Código en GEE: Extracción de SMAP	97
Anexo 4: Código en GEE: Cálculo del área de bofedales	98
Anexo 5: Código en Python: Extracción de caudales del producto GloFAS	100
Anexo 6: Tabla de extensión de bofedales en Yuracmayo	101
Anexo 7: Curvas de infiltración	102
Anexo 8: Mapa del Sistema de Monitoreo ambiental basado en la EO	104
Anexo 9: Registro fotográfico de actividades en campo	105

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo desarrollar un sistema de monitoreo ambiental basado en la Observación Terrestre o de la Tierra, para caracterizar la respuesta hidrológica de los proyectos de inversión previstos para la recuperación de humedales altoandinos. En el contexto de cuencas contribuyentes con pocos registros. Durante las últimas tres décadas, la microcuenca Yuracmayo (99 km²) muestra una tendencia creciente en la temperatura, evapotranspiración potencial y precipitación, así como una importante tendencia decreciente en los caudales. Los bofedales en Yuracmayo (140 ha) contribuyen al régimen de caudales de una de las principales represas para el suministro de agua a la ciudad de Lima. Sin embargo, la cobertura de los bofedales ha disminuido en más de un 50% en los últimos 5 años (2017 – 2021). Las mediciones en campo mostraron que los humedales altoandinos presentan tasas de infiltración lentas a moderadamente rápidas (2.36 – 22.32 cm/h), representando un estado de degradación cuando alcanzan valores mínimos. Asimismo, se explora el producto global GloFAS como una alternativa para la teledetección basada en reanálisis climáticos para monitorear caudales mensuales medios. Se obtuvieron resultados alentadores (con coeficiente de *Nash-Sutcliffe* NSE de 0.78) previo a una reducción de escala de los registros medios de caudales. Finalmente, a través de la información recolectada en campo e información analizada de distintos productos del sensoramiento remoto se evalúan indicadores ambientales, donde se encuentra que la capacidad de regulación hidrológica de la microcuenca ha disminuido del 1984 al 2014 en una tasa mayor al 20%.

PALABRAS CLAVES:

Ecología; humedales altoandinos; monitoreo; observación terrestre; regulación hídrica.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEM FOR THE ASSESSMENT OF WETLANDS USING EARTH OBSERVATION

This study aims to develop an environmental monitoring system based on Earth Observation, to characterize the hydrological response of investment projects planned for the recovery of high Andean wetlands. In the context of contributing basins with scarce information. During the last three decades, Yuracmayo micro-basin (99 km²) shows an increasing trend in temperature, potential evapotranspiration and precipitation, and a significant decreasing trend in stream flows. Yuracmayo wetlands (140 ha) contribute to the flow regime of one of the main dams for providing fresh water to Lima city. However, their coverages has decreased by more than 50% in the last 5 years. (2017 - 2021). Field measurements showed that the wetlands have slow to moderately fast infiltration rates (2.36 - 22.32 cm/h), it represents a state of degradation when wetlands have minimum values. Likewise, the global product GloFAS is explored as an alternative for remote sensing based on climatic reanalysis to monitor the average monthly flows. Encouraging results were obtained (with a Nash-Sutcliffe NSE coefficient of 0.78) prior to downscaling correction with mean streamflow records. Finally, through the information collected in field and information analyzed from different remote sensing products, environmental indicators are evaluated, where it is found that the hydrological regulation capacity of the micro-basin has decreased from 1984 to 2014 at a rate greater than 20%.

KEYWORDS:

Earth Observation; Ecohydrology; monitoring; water regulation; wetlands.

INTRODUCCIÓN

Frente a la actual crisis climática se han propuesto diferentes proyectos de inversión que mitiguen su impacto. En general, estos proyectos contemplan el uso de infraestructura gris (IG), que considera a los métodos tradicionales de gestión del agua y que emplean recursos creados por el hombre (represas, canales de derivación o defensas físicas ribereñas). No obstante, también está presente la infraestructura natural (IN), definida como la red de espacios naturales que conservan las funciones y valores de los ecosistemas, proveyendo servicios ecosistémicos [1]. De tal manera, la participación conjunta de ambas infraestructuras en los proyectos de inversión permite el correcto aprovechamiento del servicio ecosistémico hídrico (SEH).

Las intervenciones en la IN, o proyectos de inversión en ecosistemas y servicios ecosistémicos, se definen como “intervenciones relacionadas con la conservación y recuperación de capital natural que tienen como propósito recuperar la capacidad de producción de los servicios ecosistémicos” [1]. Estas intervenciones aseguran o recuperan las funciones de la infraestructura natural y su consideración en proyectos de inversión debe ser prioridad. A pesar de los múltiples beneficios que puede generar las intervenciones, a nivel global existen limitaciones como el poco desarrollo en la práctica y la falta de metodologías para monitorear el desempeño de estas. Por tal motivo, se genera la necesidad de promover investigaciones que consoliden distintas técnicas, herramientas, instrumentos y sensores dentro de un enfoque integrado para monitorear el desempeño de las intervenciones [2]. También, se resalta la importancia de la implementación de indicadores, como herramientas necesarias para medir la efectividad de una intervención específica [2]. De esta manera, investigaciones que recopilen o desarrollen indicadores para la evaluación de la efectividad de intervenciones en la infraestructura natural, aportan en el desarrollo de conocimiento para su evaluación en proyectos.

El monitoreo ambiental es el conjunto de herramientas y técnicas diseñadas para caracterizar el medio ambiente y conocer el estado de sus componentes. Dado que los

desafíos que deben resolver las intervenciones en la IN son multidimensionales y sofisticados, su evaluación necesita de Sistemas de Monitoreo (SM) completos que permitan evaluar la efectividad de una o de un conjunto de intervenciones. Con este fin, los datos y métodos de la Observación Terrestre o *Earth Observation* (EO) pueden ser realmente esclarecedores ya que brindan información cuantitativa y sistemática sobre el desempeño de las intervenciones [3]. En particular, la teledetección espacial se puede utilizar para monitorear el área de intervenciones durante un período continuo, comenzando antes de su implementación. Entre los satélites de EO de las agencias espaciales públicas se encuentran Sentinel, Landsat, TerraSAR-X y ALOS; los cuales pueden ser utilizados para monitorear las intervenciones. Distintos proyectos han demostrado su utilidad en el monitoreo de intervenciones a escala urbana como: GoGreenRoutes (implementación de corredores verdes en 6 ciudades europeas y medición de los impactos con la EO) y URBANFLUXES, que a través de datos aéreos y mediciones in situ pudieron medir flujos de energía y temperatura para evaluar el impacto de las intervenciones propuestas.

En el contexto peruano, en las zonas altoandinas se cuenta con ecosistemas altamente vulnerables a los efectos del cambio climático como son los glaciares y las cabeceras de cuenca, por ende, se debe poner en práctica y unificar ambos conceptos: intervenciones en infraestructura natural y el enfoque de monitoreo basado en la Observación Terrestre. Los proyectos que consideren la intervención en la IN cuentan con un gran potencial de desarrollo en las zonas altoandinas. En estas zonas se encuentran las cabeceras de cuenca, que son la principal fuente de agua de toda la cuenca. Ejemplo de ello es la microcuenca Yuracmayo, que forma parte de la naciente de la cuenca del río Blanco y cuenta con la represa Yuracmayo, “infraestructura gris” diseñada para el aseguramiento del recurso hídrico, pero frente al cambio climático la microcuenca aportante podría estar perdiendo la regulación de sus SEH y precisamente las intervenciones podrían mitigar este efecto.

Para aportar en el cierre de brechas de conocimiento sobre la evaluación de las intervenciones en la IN, la presente tesis responde a la siguiente pregunta: ¿Cómo caracterizar la respuesta hidrológica en áreas de interés para la ejecución de intervenciones en la Infraestructura Natural? En tal sentido, se desarrolla un sistema de monitoreo basado en la

EO antes de la ejecución de las intervenciones. El objetivo de este SM es caracterizar el funcionamiento hidrológico de los bofedales, y entender cómo ha podido evolucionar en el tiempo; y así caracterizar una línea base en el marco del sistema de monitoreo del proyecto de recuperación de bofedales en una cuenca no registrada o sin datos. La información generada servirá como referencia para que los tomadores de decisiones valoren más la potencialidad de ejecutar proyectos en IN. Del mismo modo, debido al enfoque en los SEH, será de interés para los usuarios del agua de la microcuenca tales como: comuneros, gobiernos locales, instituciones no gubernamentales, empresas prestadoras de Saneamiento (EP), entre otros.

Alcance

El presente trabajo de investigación desarrolla un sistema de monitoreo basado en la EO en la microcuenca Yuracmayo (perteneciente a la cuenca del río Rímac) con el objetivo de obtener una línea base del comportamiento hidrológico de la cuenca y bofedales.

Mediante el desarrollo del sistema de monitoreo se obtendrán datos in situ en dos bofedales pertenecientes a la quebrada Aycagranga, y se recopilarán datos obtenidos de sensores remotos y/o productos globales, los cuales servirán como base para analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca a lo largo de las últimas décadas. Asimismo, a partir de toda la información recolectada se evaluarán indicadores hidrológicos ambientales, como parte de todo sistema de monitoreo, para poder evaluar el estado actual de las características hidrológicas de la microcuenca Yuracmayo y saber cómo han variado en el tiempo.

Cabe mencionar que la presente investigación no tiene como alcance desarrollar las intervenciones o proyectos, ni estudiarlas en la etapa de operación de éstas. Pero se espera que el sistema de monitoreo desarrollado forme parte de un sistema de monitoreo completo como el de tipo Antes-Después-Control-Impacto (BACI, *Before-After Control-Impact*). Considerado como un sistema de monitoreo adecuado en identificar los impactos ambientales porque aísla la variabilidad natural [4]. En el caso de los bofedales en Yuracmayo, dado que el impacto aún no ha ocurrido, pero se conocen las posibles intervenciones, se sugirió como

óptimo iniciar con la línea base de un SM Antes-Después, tomando en consideración variables e indicadores que pueden incluirse en un SM BACI, para conocer el verdadero impacto de las intervenciones.

Justificación y motivación

En los últimos años, organismos y organizaciones internacionales como la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, en inglés) y la Unión Europea (UE, en inglés), vienen evaluando mecanismos y métodos apropiados para demostrar los beneficios de las intervenciones en la infraestructura natural. Tal es el caso, de las propuestas de estándares globales para las distintas tipologías de intervenciones [5] y métodos de evaluación a través de indicadores para su evaluación [5], [6]. Sin embargo, entre las limitaciones resaltan que los impactos de las intervenciones a su entorno generalmente toman un período de tiempo muy largo, durante el cual también pueden cambiar múltiples factores, y por lo tanto es necesario conocer las condiciones iniciales antes de ejecutar la intervención. Por tales motivos un estudio holístico de la eficiencia de una intervención o un conjunto de estas es complejo por la cantidad de tiempo y recursos necesarios.

Por ello, en distintos países se desarrollan esfuerzos para poner en práctica la evaluación de una intervención en plena etapa de ejecución u operación de ésta. Pero por la escasez de datos o pocos registros, se utilizan estimaciones o modelos sobre las condiciones iniciales (características climáticas, hidrológicas o biofísicas) y así poder interpretar cómo varían estas variables en el tiempo.

En el Perú no se han estandarizado los sistemas de monitoreo que empleen un enfoque para evaluar el rendimiento de las intervenciones en la infraestructura natural. Tampoco para caracterizar proyectos de inversión previstos. Sin embargo, en los últimos años el país ha formulado distintas herramientas que evidencian un avance del concepto de infraestructura natural en la política ambiental. Entre ellos se tiene la Ley N°31015, Ley que autoriza la Ejecución de Intervenciones en Infraestructura Social Básica, Productiva y Natural; también la Ley N°30215, Ley que promueve, regula y supervisa los Mecanismo de Retribución por

Servicios Ecosistémicos (MERESE), donde se identifica qué servicios ecosistémicos pueden formar parte de estos mecanismos.

Es así como la generación de conocimiento empírico en el uso de mecanismos y técnicas para estudiar proyectos de inversión previstos es necesario en el marco de la política ambiental peruana, y en general para aportar con buenas prácticas para la evaluación de intervenciones en la infraestructura natural. Por lo tanto, la presente investigación busca desarrollar un sistema de monitoreo basado en la Observación Terrestre aplicable en zonas con escasos registros para poder caracterizarla y entender cómo sus características hidrológicas han podido cambiar en el tiempo.

Objetivo general:

Desarrollar un sistema de monitoreo ambiental basado en la Observación Terrestre, para caracterizar el funcionamiento hidrológico de los bofedales, y medir su evolución en las últimas décadas.

Objetivos específicos:

- Caracterizar variables biofísicas de la microcuenca Yuracmayo mediante un sistema de información geográfica.
- Monitorear variables biofísicas de los humedales altoandinos a escala de cuenca mediante un sistema de información geográfica.
- Monitorear las variables hidrológicas y biofísicas en unidades de análisis con técnicas in situ a lo largo del año hidrológico
- Evaluar el cumplimiento de indicadores ambientales del sistema de monitoreo desarrollado

CAPÍTULO I

REVISIÓN CRÍTICA DE LA LITERATURA

1.1. Evaluación de bofedales en proyectos que utilizan la EO

El monitoreo basado en la Observación Terrestre es una herramienta clave para recabar información espacial y temporal de los ecosistemas. En tal sentido, se realizaron distintos proyectos y estudios de monitoreo basado en la EO para demostrar las capacidades de estas tecnologías, con el fin de monitorear y evaluar los ecosistemas de humedales.

Algunos ejemplos de estos proyectos contribuyen al monitoreo de ecosistemas relacionados con el agua para lograr las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 [7]; por otro lado, el proyecto GlobWetland [8] demuestra las capacidades actuales de la tecnología EO para respaldar el inventario, el monitoreo y la evaluación de los ecosistemas de humedales en marco de la convención de Ramsar.

En el proyecto [7] utilizan productos de resolución moderada (MODIS) y Landsat 5, 7, y 8; que tienen una resolución espacial de 30m a 250m. Cabe resaltar que parte del área de estudio de este proyecto se encuentra Perú, donde se utilizó el catálogo de imágenes Landsat en conjunto a imágenes *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) para la topografía. Por otro lado, en el proyecto [8] se utilizan sensores con una resolución espacial más refinada desde 1m hasta los 30 m. Los autores indican tanto las resoluciones espaciales y espectrales, además de la calidad de los datos de apoyo, tienen un impacto directo en la calidad de los resultados obtenidos. En ambos proyectos [7] y [8] se enfatiza que los datos satelitales de Landsat 8 y Sentinel-2 pueden capturar la extensión espacial y los cambios estacionales de ecosistemas relacionados con el agua, asimismo utilizaron como principal indicador al Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, en inglés) para la delimitación de los ecosistemas. Ambos proyectos coinciden que los resultados obtenidos pueden ser un gran complemento para las campañas de monitoreo terrestre existentes y para que las autoridades

del agua correspondientes fomenten actividades coordinadas de muestreo y/o monitoreo de campo bajo información satelital.

Una de las limitaciones que se menciona en [7] es que el uso de los recursos de la EO puede ser más desafiantes en naciones pequeñas para evaluar la extensión de los ecosistema debido a limitaciones de clima y escala. Asimismo, en las investigaciones mencionadas [7] y [8] los errores pueden resultar del proceso del método de mapeo para el cálculo de las variables, los datos utilizados o el sesgo de los analistas, frente a ello, datos obtenidos en campo son necesarios para validar los resultados.

1.2. Uso de *Google Earth Engine* en investigaciones de la EO

Gran parte de los recursos de la EO son de libre acceso, y un reconocido catálogo de colecciones de imágenes satelitales gratuitas la podemos encontrar en *Google Earth Engine* (GEE). En las últimas décadas más investigaciones utilizan esta colección de imágenes en la nube para el mapeo y/o monitoreo de los humedales. Entre algunos estudios están las investigaciones en [9], [10] y [11].

En [9] se analizaron los humedales de la cuenca Dianchi (China), de 1988 a 2020 a partir de datos de imágenes Landsat, la precisión general de la mayoría de los años superó el 80 %, por lo que concluyó que los resultados pueden compensar la falta de información sobre los cambios de cobertura de los humedales en las últimas 3 décadas. En [10] se construyó un sistema de clasificación de humedales tropicales utilizando imágenes Sentinel-2, se obtuvo un mapa preciso de cobertura de humedales en Vietnam con una precisión global superior al 80%. La investigación [11] se centró en mapear pequeños humedales estacionales en los entornos semiáridos de Sudáfrica a través de distintos algoritmos de *Machine Learning* con GEE. Se utilizaron imágenes de Sentinel 2 en un periodo de 2016 a 2020, los resultados demostraron que para el algoritmo basado en *Random forest* se obtuvieron mejores resultados obteniendo una precisión general en un rango de 68% a 80%.

Los tres estudios demostraron una precisión general muy alta en el uso de las imágenes satelitales de GEE y a través de series de tiempo analizaron los cambios

interanuales presentes, así como las tendencias. Para la delimitación de los humedales utilizaron como principal índice el NDVI, y para identificar los cambios de estacionalidad y aumento de cuerpos de agua utilizaron los índices de vegetación mejorado (EVI, en inglés) y el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI, en inglés).

Una de las limitaciones que surgen en el estudio de las variables climáticas y de ecosistemas es encontrar recursos que cubran numerosas décadas. En [9] utilizaron la colección de imágenes Landsat (5,7 y 8) para la extracción de información de humedales para un periodo de 32 años, en cambio en [10] y [11] utilizaron exclusivamente los datos de Sentinel-2 porque ofrecía una mayor resolución espacial y el alcance del periodo analizado era menor 10 años. De esta manera, se dificulta recopilar datos uniformes con una buena resolución espacial y una gran brecha temporal para el estudio del clima y ecosistemas.

1.3. Índices multiespectrales utilizados para el estudio de bofedales en Perú

En Perú el índice NDVI generalmente ha sido muy utilizado para el estudio de bofedales. Distintas investigaciones utilizan procedimientos para zonificar mejor la cobertura de bofedales utilizando índices multiespectrales. En [12] para delimitar los bofedales perennes y temporales, se basaron exclusivamente de los valores del NDVI por temporada, y para delimitar si están saturados o no, del Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII, en inglés). Investigaciones tales como [12] y [13] concluyen que para las zonas altoandinas semiáridas existe cierta dependencia estadística de la extensión del bofedal con otras fuentes de agua como las provenientes de las quebradas, el deshielo de glaciares y la precipitación. Otra investigación situada en una zona altoandina de Arequipa [14] evidenció que los valores de NDVI presentan una correlación alta con características climáticas como precipitación y temperatura, asimismo, en este caso se evidenció una disminución del valor del NDVI de julio a agosto en todos los años, donde correspondía una temporada de estiaje.

A partir de las investigaciones mencionadas, se evidencia que para el estudio de humedales se utiliza generalmente el índice NDVI. En ocasiones este índice puede ser sensible a los efectos de la atmósfera y el suelo, por lo que se recomienda aplicar índices adicionales

para un análisis más preciso de la vegetación como el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) o Índice de Vegetación Mejorado (EVI). También, para el caso de humedales saturados se recomienda el uso del Índice de Agua de Diferencia normalizada (NDWI) para diferenciar la cobertura vegetal del cuerpo de agua.

1.4. Uso de la teledetección y reanálisis climático en la modelación hidrológica para la obtención de características climáticas

Una característica importante en el estudio de los humedales es la descarga de agua de éstos. Frente a ello, hay productos de reanálisis hidrológico basados en información satelital que permiten estudiar características hidrológicas como la precipitación e incluso del caudal. En Perú se ha evaluado la utilidad del sistema global de predicción de inundaciones (GloFAS) y otros productos en diferentes niveles de desarrollo e implementación; sin embargo, no existen suficientes investigaciones a la fecha para poder generalizar su empleo en Perú considerando sus nuevas versiones que cuentan con resoluciones más finas, y mucho menos para la cuenca alta del río Rímac. Un reciente estudio [15] desarrolla una comparación de diversos productos de reanálisis con base satelital e in-situ para caudales (PISCO-Hym-GR2M, GRUN, y LORA) para la cuenca del río Piura, encontrando resultados aceptables para la aplicación de estos productos.

En [16] se evaluó al producto GloFAS y su capacidad de predicción de inundaciones en Perú. Se compararon resultados simulados por GloFAS en su primera versión (GloFAS v1.0 [17]), que ofrece los caudales diarios a una resolución desde 18 a 36 km en procesamiento, con 10 estaciones de aforo en distintas regiones del país. Respecto a la validación de caudales, se obtuvo una mejora de los datos crudos de caudales simulados por GloFAS luego de un postprocesamiento. El índice de *Nash-Sutcliffe Eficiencia* aplicado en los hidrogramas interdiarios osciló entre 0.27 y 0.73, con un promedio ponderado de 0.46. Indicando una representación general satisfactoria en la simulación de caudales diarios.

Resultados no alentadores se obtuvieron en la cuenca de Piura [18] donde se utilizó el producto GloFAS en su versión (GloFAS v2.1), el cual posee una resolución gruesa desde

10 hasta 65 km en el procesamiento. El uso de GloFAS v2.1 no logra captar el régimen caudal, por ello no puede capturar el patrón de magnitud observado, ni tampoco se tienen mejores resultados después de un postprocesamiento. Cabe mencionar que el producto GloFAS utilizado si pudo representar anomalías de flujo alto en temporadas como la del Fenómeno de El Niño del 2016.

En [19] se compara las curvas de exceso de caudal diario para los datos de caudal diario observado y los datos de caudal diario modelado entre 2008 y 2015 en siete cuencas del Perú con escasos registros. En este estudio utilizaron el producto GloFAS v.1.0. En la mayoría de las cuencas analizadas existe una gran diferencia en la forma de la curva de duración diaria, esto significa que GloFAS no puede replicar el régimen de flujo, pero si puede haber oportunidades en alertar inundaciones con un rendimiento limitado.

1.5. Evaluación de la humedad del suelo a través de SIG

La humedad del suelo es una variable crítica que vincula el sistema atmosférico y el ecosistema terrestre, también es un parámetro importante para el estudio del cambio climático. Puede ser obtenida de forma remota (espacial) a través de mediciones y sensores remotos; y de manera in-situ, a través de mediciones puntuales y precisas, pero limitadas debido al número de estaciones y la representatividad de las observaciones de un solo punto. Existen distintos sensores remotos que monitorean esta variable como los sensores: SMAP, SMOS y GCOM-W. En [20] se utilizó el producto SMAP para el monitoreo de la sequía en pastizales de las llanuras altas de EE. UU. La validación de la humedad del suelo superficial de SMAP (SSM) con estimaciones in situ mostró un nivel de correlación aceptable. La correlación más alta se dio con las mediciones in situ a 5 cm, obteniéndose valores aceptables para todos los sitios ($r > 0.60$), aunque la correlación disminuía en las capas más profundas del suelo.

En [21] se realizó un análisis comparativo del producto SMAP y mediciones in situ, para el período de tiempo de marzo de 2015 a enero de 2022, de 35 redes de medición de humedad de suelo dispersas y distribuidas globalmente. Los resultados mostraron una

concordancia satisfactoria entre SMAP y las mediciones in situ (r entre 0,19 y 0,95). Asimismo, gracias a una corrección del efecto de la vegetación aplicada en el algoritmo activo-pasivo del sensor se obtuvieron mejores resultados.

Por último, en [22] se evaluaron 6 productos de humedad del suelo: SMOS, SMAP, AMSR2, GCOM-W, FY-3B y FY-3C; en la provincia de Hunan, China. Los resultados muestran que SMAP muestra el mejor desempeño general en la provincia de Hunan ($r > 0.30$ respecto a datos observados). Además, los resultados demuestran una precisión estable y no se ve afectado fácilmente por factores ambientales, mientras que los resultados obtenidos por la serie FY de productos satelitales muestra el peor rendimiento y algunos datos de teledetección de la red se correlacionan negativamente con los datos de medición terrestre.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas de monitoreo ambiental

Un sistema de monitoreo ambiental es un sistema integral de seguimiento continuo de mediciones y observaciones de distintos componentes de la naturaleza (atmósfera, hidrósfera, biósfera y litósfera) influenciados por factores naturales y antrópicos [23]. Esto se realiza mediante un programa de toma de mediciones repetitivas bajo un objetivo principal durante un periodo de tiempo determinado [24]. Este seguimiento se puede dar antes de la etapa de un proyecto lo que se categoriza como una línea base, es decir, medir el estado del medio ambiente antes de alguna intervención; mientras que el monitoreo posterior a la intervención incluye las actividades de seguimiento para medir los impactos ambientales de la ejecución de la intervención [25].

2.1.1. Medición de parámetros ambientales

La medición de parámetros ambientales se define como la acción de medir variables en los componentes de la naturaleza [26]. Acorde a la forma en cómo se desarrolla esta acción en la investigación, se clasifica en tres tipos: a) parámetro medido con sensor, b) colecta de muestra para su posterior medición a través de un ensayo en laboratorio y c) parámetro identificado mediante la observación. Esta última técnica se considera una forma de medición no invasiva, ya sea a través de una toma fotográfica o satelital, u observar cualitativamente una característica de una muestra, ubicación o entorno [26].

2.1.2. Colección de la muestra y parámetro

La colección de la muestra es el acto de coleccionar una porción de algún componente ambiental para realizar una medición de sus parámetros [26]. En la investigación se coleccionará muestras de suelo. Los parámetros son las variables, es decir, la concentración o presencia

de elementos, o características únicas a identificar o cuantificar de una muestra. En la investigación se medirán parámetros en los componentes ambientales: bofedales.

2.1.3. Propiedades espaciales y temporales

Las propiedades espaciales hacen referencia a la recolección de muestras (número de puntos) y su distribución espacial. La distribución espacial puede ser discreta (intervalos fijos en un plano) o estratificada (definido por capas o estratos) [26]. En la investigación no habrá una distribución estratificada, pero si una discreta, la cual se encuentra en las áreas con mayor aporte hídrico a la represa Yuracmayo (quebrada Aycagranga). Por otro lado, las propiedades temporales se refieren a la recolección de muestras o mediciones a lo largo del tiempo, puede darse desde intervalos de tiempo muy precisos (segundos) o largos periodos de tiempo (anuales) [26].

2.1.4. Unidades representativas

Se debe priorizar que un punto o conjunto de puntos de muestreo posean una gran representatividad del entorno a muestrear. No existe una definición única para una muestra y su representatividad, por eso comúnmente para cada caso y objetivo de estudio se tiene recomendaciones, guías o protocolos de muestreo [26]. Para la consideración de una unidad representativa, la presente investigación considera como referencia las guías y protocolos nacionales detallados en el capítulo de metodología.

2.1.5. Plan de muestro ambiental

Un plan de muestreo se define a través del objetivo del estudio, ejemplo de ello es analizar el cambio de cobertura vegetal en una cuenca o analizar la concentración de sedimentos de fondo transportados por un curso de agua. En general hay tres limitaciones en todo plan de muestreo: número de puntos de muestreo, cantidad de muestras extraídas y ubicación de la muestra, que se relaciona con las limitaciones por los costos, el acceso y o la técnica ejecutada. Todo plan de muestreo debe contener algunos elementos como: número y tipo de muestras colectadas, representatividad, parámetros a medir y frecuencia de obtención.

2.2. Sistemas de información geográfica (SIG)

Los SIG tienen dos componentes principales: una base de datos de información y una interfaz con capacidad de visualización georreferenciada [27]. La interacción de estos componentes nos puede ofrecer distintos productos de interés georreferenciados como se muestra en la **Fig. 2.1**, una capa suelos, un modelo de elevaciones, una capa de principales ríos, carreteras, entre otras.

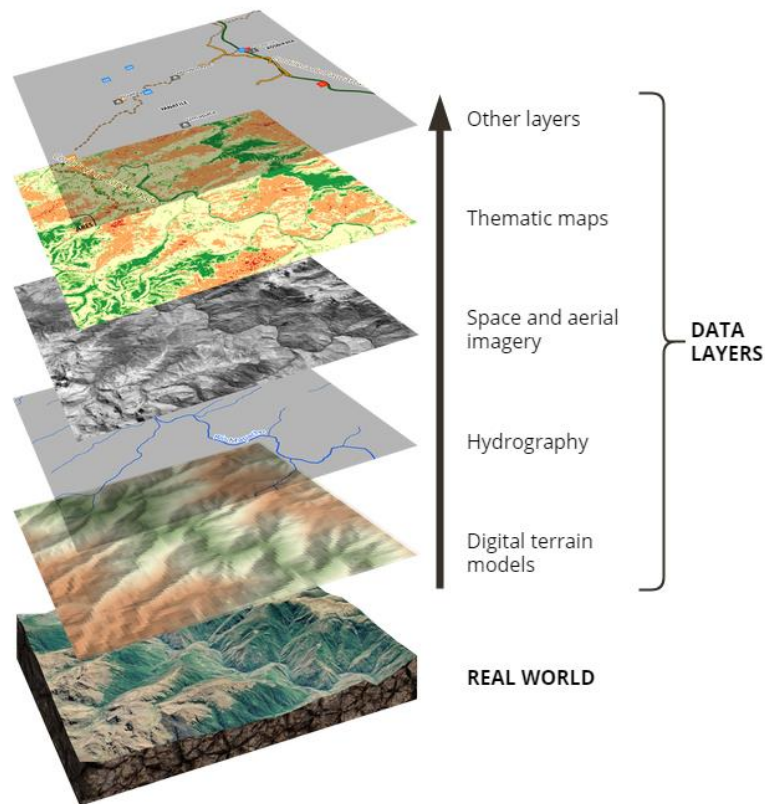


Fig. 2.1. Combinando capas de datos en un Sistema de Información Geográfica [28]

Entre las ventajas de usar GIS se encuentra:

- Permite el manejo y exploración de grandes volúmenes de datos.
- Permite la integración de datos de fuentes muy dispares.
- Explora los componentes geográficos y temáticos de los datos de manera holística.
- Permite una amplia variedad de formas de visualización

2.2.1. Recopilación de datos de forma aérea

Los datos de ubicación, incluida la elevación, se pueden recopilar de fuentes aéreas a través de sensores remotos (satélites). Para la ubicación se puede incluir fotografías aéreas estereoscópicas, sonar (ondas ultrasónicas) y radar (pulso de radiaciones electromagnéticas). Estas tecnologías envían una ráfaga continua de señales, miden el tiempo que tardan las señales en recuperarse y utilizan esa información para trazar un mapa del terreno, de la infraestructura y cobertura terrestre en general [27]. Por otro lado, las ortofotos son otro medio de recopilar datos de ubicación en el aire, comúnmente por vehículos aéreos no tripulados como lo es el *drone*. Las ortofotos son una serie de fotos superpuestas que toman imágenes de las mismas características del suelo desde varios ángulos para obtener como producto un mapa georreferenciado y con una mayor resolución espacial, pero a menor escala (local). También se pueden recopilar datos de elevación, en SIG, los datos de elevación se recopilan en lo que se denominan modelos digitales de elevación (DEM).

2.3. Sensoramiento remoto para el monitoreo ambiental

Para tener un mejor entendimiento de las intervenciones climáticas y humanas con el medio ambiente, es necesario desarrollar e implementar herramientas de investigación y monitoreo ambiental más efectivas y avanzadas. El sensoramiento, percepción remota o teledetección es una herramienta efectiva para la vigilancia ambiental de la superficie y la atmósfera de la Tierra. La teledetección se refiere a la adquisición de información biofísica y geoquímica sobre la condición y el estado de la superficie terrestre mediante sensores que no están en contacto físico directo con ella [29].

2.3.1. Principios físicos

La información recopilada a través del sensoramiento remoto se transmite en forma de radiación electromagnética, y la fuente de esta energía puede ser "pasiva" (que se origina en el sol y/o la Tierra) o "activa" (la energía se genera artificialmente como en radar). La relación entre la señal de fuente o la irradiancia que interactúa con la superficie y la señal recibida reflejada proporciona la información que se utiliza en la teledetección para

caracterizar la superficie de la Tierra. La señal de detección remota se compone de energía que representa diferentes longitudes de onda en el espectro electromagnético (ver, **Fig. 2.2**).

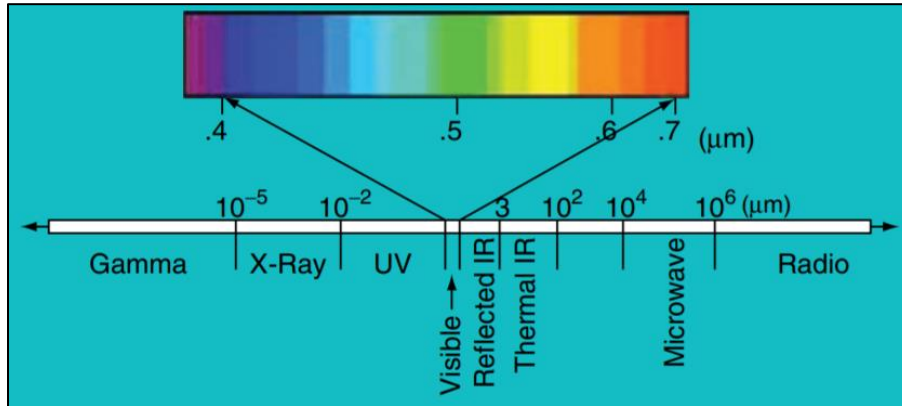


Fig. 2.2. Diagrama del espectro electromagnético [29]

Esta última figura muestra que utilizando la teledetección se alcanza una extensión mayor a la luz visible, a diferentes partes del espectro electromagnético, útiles para distintas aplicaciones para el monitoreo ambiental. Un mayor detalle de la aplicación de variables ambientales de cada región espectral se presenta en la **Tabla 2.1**.

Región espectral	Longitud de onda	Aplicación
Ultravioleta (UV)	0.003 a 0.4 μm	Contaminación aérea
Visible (VIS)	0.4 a 0.7 μm	Pigmentos, clorofila
Infrarrojo cercano (NIR)	0.7 a 1.3 μm	Estructura de dosel biomasa
Infrarrojo medio (MIR)	1.3 a 3.0 μm	Humedad de la hoja, madera, hojarasca
Infrarrojos térmicos (TIR)	3 a 14 μm	Sequía, estrés vegetal
Microonda	0.3 a 300 cm	Humeda del suelo, rugosidad

Tabla 2.1. Regiones del espectro electromagnético utilizadas en monitoreo ambiental [29]

2.3.2. Estimación de variables biofísicas con teledetección

Se puede agrupar los métodos de recopilación de variables biofísicas en tres grupos: redes neuronales, aplicación de modelos y métodos empíricos [30]. Dado que en la presente investigación solo se utiliza los métodos empíricos se describe este método.

Métodos empíricos

Este método se basa en la relación de la reflectancia de las imágenes satélites con medidas empíricas de parámetros sobre el terreno. Es caracterizado por ser una medida no invasiva; sin embargo, los resultados se condicionan a las condiciones particulares donde fue tomada la fotografía (luminosidad, nubosidad, interferencia, etc.). Los índices que se pueden derivar tras el procesamiento de las imágenes satelitales se pueden clasificar como se detalla en la **Tabla 2.2**.

Índices espectrales	Índices de vegetación	Índices de vegetación ajustados a los efectos del suelo	Índices de vegetación ajustados a los efectos atmosféricos	Índices de clorofila y actividad fotosintética
Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) Índice brillante (BI) Índice de vegetación verde (GVI) Índice de humedad (WI)	Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) Índice de vegetación de diferencia ponderada (WDVI) Índice de Vegetación Ambiental (EVI)	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Transformado (TSAVI)	Índice de Resistencia Atmosférica (ARVI) Índice de Vigilancia del Medio Ambiente Mundial (GEMI)	Índice de reflectancia fotoquímica (PRI) Integral de Absorción de Clorofila (CAI) Índice normalizado de clorofila pigmentaria (NCPI)

Tabla 2.2. División de los tipos de índices derivados de imágenes satelitales [29]

2.4. Infraestructura natural (IN)

La infraestructura natural es el enfoque que se le da a los sistemas naturales y su capacidad de proactividad de ofrecer beneficios al ambiente y personas. Para el caso de gestión hídrica, la IN se aplica a la disponibilidad del agua y no solo como un medio pasivo para el uso y desvío del recurso hídrico [31]. Dado que el cambio climático impacta a los ecosistemas, la gestión de la infraestructura natural tiene un papel clave para mitigar los efectos de este cambio [32]. Particularmente en los Andes se ha evidenciado que intervenciones en la infraestructura natural son estrategias importantes para disminuir los riesgos de la erosión hídrica, mejorar la regulación hídrica y mejorar las propiedades importantes del suelo [33].

2.4.1. Brechas de conocimiento de los efectos de las intervenciones en IN

Las principales brechas de conocimiento acerca de los efectos de las intervenciones en la infraestructura natural son tres [33]: (1) Ausencia de resultados a escala microcuenca de los impactos de las intervenciones en IN. La mayoría de los estudios se realizan a nivel de parcela, por lo que una generalización a partir de estos resultados a nivel cuenca sería errónea. (2) Falta de evidencia de estudios de caso con datos cuantitativos. Se reconoce la necesidad del diseño de sistemas de monitoreo para intervenciones en infraestructura natural. (3) Inexistencia de un análisis integral sobre el rol de la IN frente a eventos extremos. La mayoría de las investigaciones se enfocan en la ocurrencia de eventos lluvias leves y no eventos extremos como es el Fenómeno de El Niño.

2.5. Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas. Se clasifican en a) beneficios pocos obvios, aquellos beneficios de soporte y regulación y b) beneficios notorios, beneficios de provisión y culturales [34]. Una categoría más detallada lo subdivide en cuatro tipos de servicios ecosistémicos. (1) Los de provisión, se obtienen de los beneficios de los bienes y servicios que la persona obtiene directamente de los ecosistemas. (2) Los de regulación, son los beneficios que regulan los procesos como calidad de aire, clima y erosión de suelos. (3) Los culturales, son beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas. (4) Por último, los de soporte son los servicios necesarios para producir los demás servicios [35].

Cabe diferenciar el concepto de servicios ecosistémicos de otros conceptos que se basan en los ecosistemas, pero tienen connotaciones diferentes como demuestra en la **Fig. 2.3.**

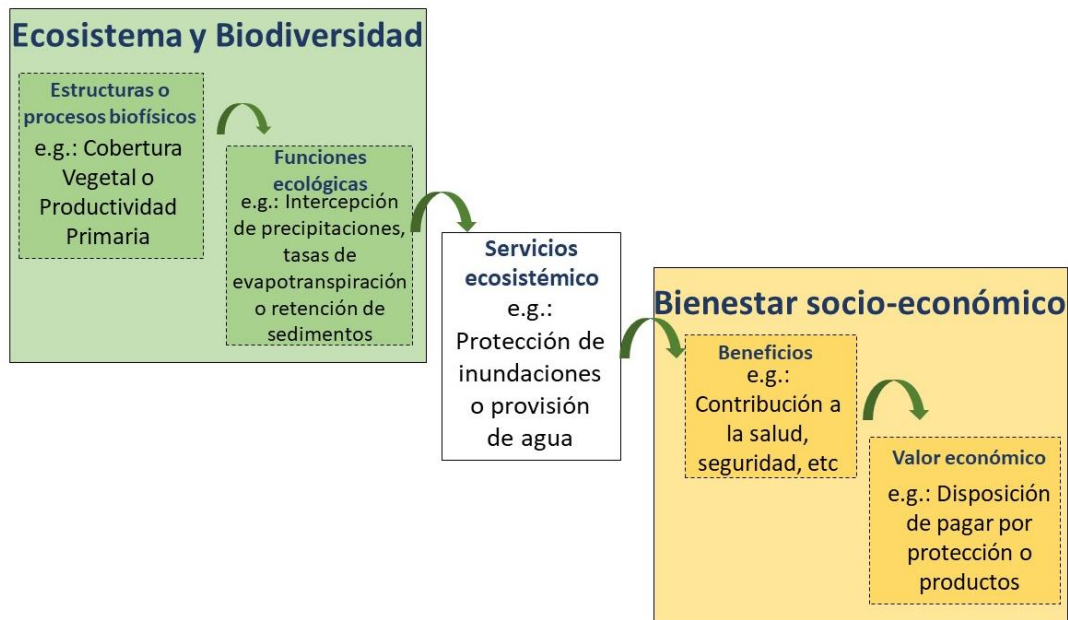


Fig. 2.3. Marco para vincular los ecosistemas con el bienestar humano [36]

Este concepto en cascada indica que un servicio ecosistémico se origina por funciones ecosistémicas (reciclaje de materia orgánica, producción de biomasa, etc.), los cuales se basan en procesos ecosistémicos (fotosíntesis, nitrificación, absorción de nutrientes, etc.). El uso de este servicio produce beneficios ecosistémicos a las personas, cuyo valor económico depende de cada sociedad.

2.5.1. Servicios ecosistémicos hídricos

Los servicios ecosistémicos hídricos son los servicios ecosistémicos relacionados con el agua y han sido abordados desde dos enfoques en la organización de su análisis. El primer enfoque considera la tipología del ecosistema dividiéndolo en servicios ofrecidos por sistemas de agua dulce (ríos, lagos, aguas subterráneas y humedales) y sistemas marinos (aguas de transición, costeras, de plataforma y oceánicas) [37]. El segundo enfoque discutió los servicios ecosistémicos hidrológicos, definiéndose como servicios que ofrecen beneficios para las personas producidos por los efectos de los ecosistemas terrestres en el agua dulce y su interacción con el ciclo hidrológico [38]. En el presente estudio indicamos a los “servicios ecosistémicos hídricos” como aquellos servicios ecosistémicos que involucran sistemas de agua dulce (ríos y humedales), a través de su función ecosistémica de regulación de flujos

(escorrentía, percolación y evapotranspiración), y su interacción con los procesos en la cuenca hidrográfica.

Servicio ecosistémico de regulación hídrica

El servicio ecosistémico de regulación hídrica implica la conservación y provisión del agua en periodos lluviosos y liberación en periodos de estiaje a través del ecosistema terrestre para la utilización humana directa e indirecta [39]. Esta es una respuesta hidrológica del ecosistema terrestre a los eventos climáticos como por ejemplo precipitación y evapotranspiración [40]. La alta regulación hidrológica se debe principalmente por 2 factores [41].

- La alta capacidad de almacenamiento de los suelos.
- La morfología de las cuencas.

La regulación hidrológica es más fuerte en cuencas provistas de acuíferos profundos, donde el agua puede ser almacenada por décadas, también en cuencas con glaciares, donde el almacenamiento también se produce en el glaciar en forma de hielo o nieve.

Servicio ecosistémico de control de erosión de suelos

Este servicio ecosistémico se refiere a la capacidad del ecosistema de disminuir las fuerzas del desprendimiento de las partículas del suelo, producida por las fuerzas de erosión del agua. El proceso de erosión puede ser analizado desde el desprendimiento de las partículas de suelo, debido al impacto de la precipitación hasta ser removida por la escorrentía (flujo superficial) y llegar a formar parte de un curso de agua [42].

Servicio ecosistémico de regulación de riesgos naturales

Los riesgos naturales son procesos o fenómenos naturales que pueden causar impactos negativos a la personas (económicos, de mobiliario y salud) o daños ambientales a consecuencia de elementos vulnerables en áreas expuestas a peligros [43].

Los peligros naturales son aquellos elementos del medio ambiente físico, o del entorno físico, perjudiciales al hombre y causados por fuerzas ajenas a él [44]. Mientras que el riesgo sería la probabilidad y las consecuencias de no controlar este peligro. Su ocurrencia

se debe a fenómenos naturales potencialmente peligrosos que según su origen pueden ser hidrológicos, atmosféricos, sísmicos, volcánicos, incendios y otros fenómenos [45]. Entonces, este tipo de servicios ecosistémicos se basa en mitigar los impactos de los riesgos naturales cuando estos ocurran, para esta investigación se consideran los riesgos hidrológicos, específicamente las sequías.

2.6. Modelación del ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es el concepto básico de la hidrología que no tiene inicio ni fin, pero sí procesos continuos [46]. Estos procesos son los siguientes: evapotranspiración, precipitación, infiltración, percolación y flujo subterráneo como se muestra. La **Fig. 2.4** muestra la interacción de este ciclo para un bofedal, donde la recarga del bofedal se debe a 4 principales ingresos (escorrentía del área de aporte, flujo de agua subterránea, precipitación y caudal de ingreso) y también cuenta con 4 principales salidas (evapotranspiración, filtración hacia el suelo, drenaje artificial y caudal de salida por exceso de saturación). El almacenamiento del agua en el bofedal se da cuando los flujos de salida son menores a los de ingreso, comúnmente en época de avenida.



Fig. 2.4. Entradas y salidas de balance hídrico para la protección y restauración de humedales altoandinos [47]

El modelamiento del ciclo hidrológico es una aproximación del sistema real, donde sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles. Por tal motivo se considera el sistema hidrológico “cuenca” como una frontera que tiene entradas y salidas, y en su superficie características únicas que la representan. Los modelos hidrológicos se pueden dividir en dos categorías: modelos físicos y modelos abstractos. Los modelos físicos son modelos que representan el sistema en una escala reducida como un modelo hidráulico o un modelo analógico (funcionamiento de un sistema físico como prototipo de algún proceso hidrológico). Mientras que un modelo abstracto representa el sistema en forma matemática. Es decir, su funcionamiento se expresa mediante ecuaciones que involucran cada variable [46]. Otra clasificación los divide como modelos empíricos, conceptuales y físicos, y son subdivididos a su vez en modelos agregados, semi-distribuidos y distribuidos [46].

2.7. Datos generados a través del reanálisis y modelado hidroclimático

El reanálisis es un enfoque sistemático para producir un conjunto de datos para el monitoreo del clima, ampliamente utilizado en estudios hidroclimáticos. Se crean mediante el procesamiento de datos observacionales (a través de sensores remotos y datos in-situ) con modelos numéricos para producir la mejor estimación de la atmósfera. Los datos producidos en una grilla de imagen para una resolución espacial dada proporcionan una estimación del estado del clima en cada paso de tiempo. Asimismo, pueden generar variables tanto en la superficie terrestre como en los niveles atmosféricos verticales.

2.7.1. Productos de reanálisis climático: ERA-Interim y ERA5

El Centro Europeo para el Pronóstico del Tiempo a Medio Plazo (ECMWF, en inglés) utiliza sus sistemas de pronóstico para generar conjuntos de datos globales para la atmósfera, la tierra, la superficie y los océanos. Los datos de reanálisis destacados son los datos ERA-Interim y ERA5. ERA-INTERIM son datos atmosféricos globales con una ventana de análisis de 6 h, una resolución espacial de 80 km y un período de tiempo de 1979 a 2019. Una versión más reciente es ERA5, con una resolución espacial de 30 × 30 km y con una calidad de datos mejorada.

2.7.2 GloFAS-ERA5: Caudales operacionales del reanálisis hidrológico

El reanálisis hidrológico incluye a la descarga fluvial como variable resultante del reanálisis climático a través de un modelo hidrológico. El producto GloFAS-ERA5 utiliza el componente de escorrentía HTESSEL del modelo de reanálisis global ECMWF - ERA5, con el modelo hidrológico y de enrutamiento de canales LISFLOOD [48]. Este acoplamiento, permite la conectividad lateral de las celdas de cuadrícula con la escorrentía enrutada a través del canal del río para producir la descarga del río en m^3/s de un área de captación. En la **Fig.2.5** se proporciona un esquema de los componentes clave en la producción del reanálisis GloFAS-ERA5.

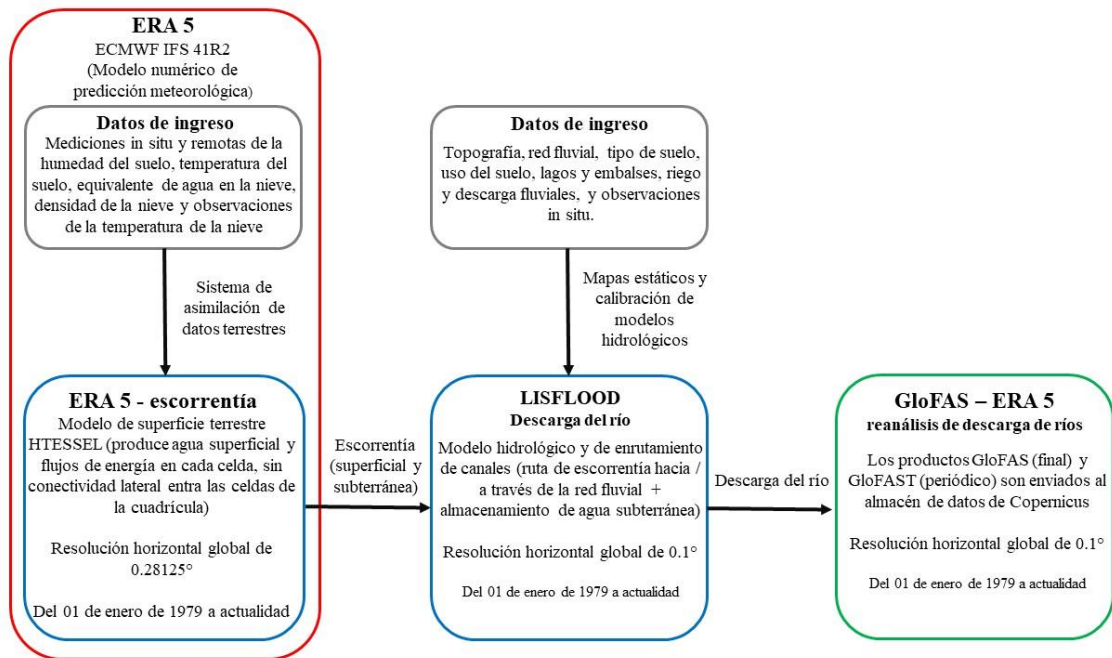


Fig. 2.5. Esquema de los componentes clave en la producción del conjunto de datos de reanálisis de descarga de ríos GloFAS-ERA5 [48]

2.8. Evaluación de desempeño en modelos hidrológicos

El desempeño en las simulaciones desarrollados por modelos se puede medir a través de indicadores de modelos hidrológicos como: Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), Raíz del error cuadrático medio (RMSE, en inglés) y Sesgo porcentual (PBIAS, en inglés), entre otros. A continuación, se detalla cómo hallar cada uno de estos indicadores en la **Tabla 2.3**.

Indicador	NSE	RMSE	PBIAS
Fórmula	$1 - \frac{\left[\sum_{t=1}^p 1(Y_{t,obs} - Y_{t,sim})^2 \right]}{\left[\sum_{t=1}^p 1(Y_{t,obs} - \mu_{Y,obs})^2 \right]}$	$\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^p (Y_{t,obs} - Y_{t,sim})^2}{p}}$	$\left[\frac{\sum_{t=1}^p (Y_{t,obs} - Y_{t,sim}) * 100}{\sum_{t=1}^p (Y_{t,obs})} \right]$
Leyenda	$Y_{t,obs}$ = Serie de tiempo de datos observados $Y_{t,sim}$ = Serie de tiempo de datos simulados $\mu_{Y,obs}$ = Promedio de datos observados p = Número de datos		
Definición	El NSE es un estadístico normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza residual respecto a la varianza de los datos medidos. Un NSE=1, significa una coincidencia perfecta, mientras que NSE=0 representa una coincidencia pésima, donde indicaría que la media observada es mejor predictora que el modelo simulado.	El RMSE es la desviación estándar de los residuos (errores de predicción). Un RMSE = 0, implica una simulación perfecta, todo lo contrario, es cuando se obtiene un valor alto.	El PBIAS mide la tendencia promedio de los valores simulados a ser mayores o menores que los observados. Un PBIAS = 0, implica una simulación perfecta, y valores que superen en magnitud el 50% es un pésimo modelo.
Referencia	[49]	[50]	[51]

Tabla 2.3. Formulación de indicadores para series climáticas [52]

Simulaciones aceptables son aquellas que cumplen con los límites establecidos por cada indicador, como se muestra en la **Tabla 2.4**. En general un modelo se puede considerar adecuado cuanto tienen un NSE >0.50, y PBIAS <± 25% para la modelación de caudal.

NSE	RMSE	PBIAS	Interpretación
<0.00	Alto	>± 50%	Pésima
<0.50	Medio	>± 25%	Inaceptable
>0.50	Bajo	<± 25%	Aceptable
~ 1	~ 0	~ 0	Mejor simulación

Tabla 2.4. Criterios de aceptabilidad de simulaciones basadas en su desempeño [53] y [54]

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Caracterización de la investigación

La presente investigación según su finalidad es del tipo aplicada, dado que concentra su atención en el problema de la falta de un sistema de monitoreo para evaluar la microcuenca Yuracmayo ante la futura ejecución de intervenciones en la infraestructura natural.

La investigación tiene un diseño no experimental, dado que no se manipulan las variables intencionalmente, sino, se descubre el estado del ecosistema en cierto momento y se analiza cómo ha podido variar en el tiempo. Se clasifica como una investigación transversal u observacional debido a que tiene como propósito “describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. “Es como tomar una fotografía de algo que sucede” [55]. Siendo, uno de los hitos de esta investigación la evaluación del estado de los ecosistemas en campo, lo que se considera como “tomar una fotografía” del estado de los ecosistemas en cierto momento.

Adicionalmente, la investigación tiene un alcance descriptivo - propositivo. El alcance descriptivo se desarrolla con el cumplimiento de los tres primeros hitos que son: la caracterización de la microcuenca Yuracmayo y su monitoreo. Mientras que el alcance propositivo se desarrolla con las propuesta y evaluación de indicadores del sistema de monitoreo.

Con respecto a la recolección de los datos, la principal fuente son los parámetros cualitativos y cuantitativos obtenidos en campo, así como los productos regionales o globales de sensoramiento remoto, basados en información satelital y de reanálisis climático. Por eso se utiliza una metodología mixta cuyos datos recopilados sirven para ser evaluados a través de indicadores del sistema de monitoreo.

3.1. Procesos de la investigación

La investigación presenta cuatro objetivos específicos y cuatro hitos importantes, que tiene como producto final el desarrollo del sistema de monitoreo de bofedales en Yuracmayo. Cada hito se obtiene de manera secuencial, en conjunto a una revisión bibliográfica durante toda la investigación y actividades en campo a inicio del segundo y tercer paquete de trabajo. Esquemáticamente se presenta los cuatro paquetes de trabajos que corresponden a cada objetivo específico en la **Fig. 3.1**.

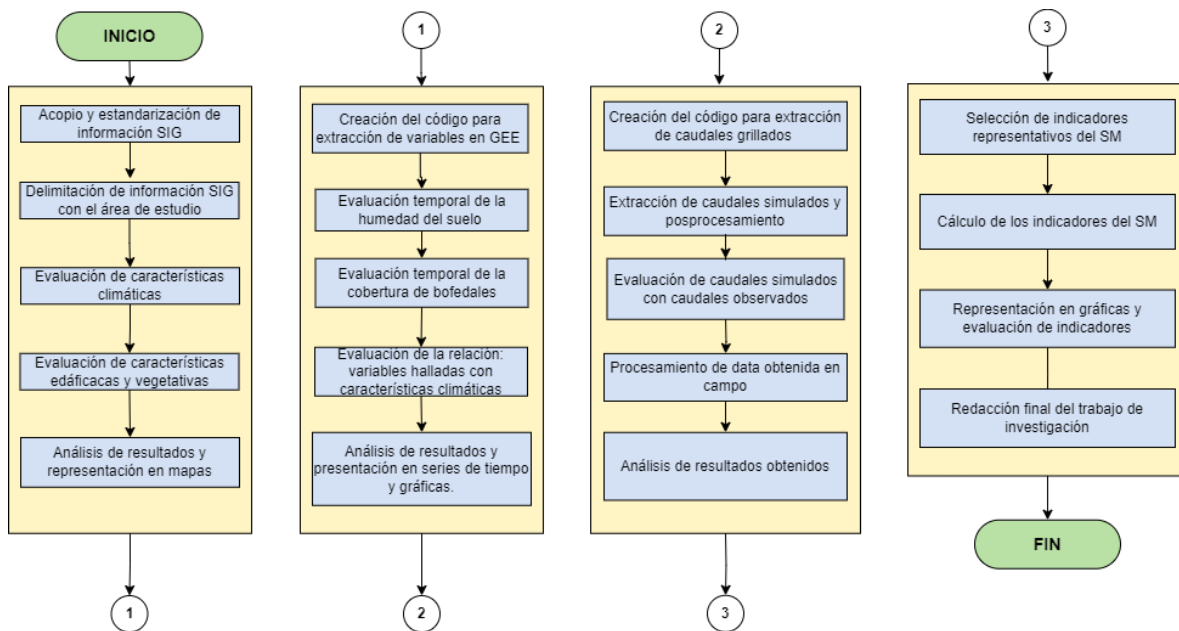


Fig. 3.1. Diagrama de flujo de la tesis

3.2. Estructura del marco metodológico

3.2.1. Área de estudio

El área de estudio se concentra en la microcuenca Yuracmayo. La microcuenca Yuracmayo se encuentra ubicada en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima. Forma parte de la cabecera de la cuenca del Río Rímac, y cuenta con la represa Yuracmayo, infraestructura clave para la seguridad hídrica de Lima ciudad. La microcuenca tiene un área de 99 km², donde los principales ecosistemas que se desarrollan son: glaciares, zonas periglaciares, lagunas, bofedales, pajonales y matorrales [56] (ver **Fig.**

3.2.). En la microcuenca existe un periodo marcado de recarga por lluvias (noviembre – abril) y de estiaje (mayo - octubre). Los nevados Sullcón y Paccha son uno de los reservorios más importante de la represa Yuracmayo y contribuyen a los cursos de agua que forman las quebradas del área [57]. En las quebradas que no tienen un origen glaciar, como la quebrada Aycagranga, presenta bofedales los cuales se caracterizan por ser áreas donde ocurre una cierta retención del agua [56]. Los bofedales monitoreados en la investigación pertenecen a la subcuenca Aycagranga (**Fig. 3.2**), estos dos bofedales se encuentran en el cauce principal de la quebrada del mismo nombre y están ubicados en la parte media y baja. Se decidió analizar ambos bofedales por su accesibilidad, extensión y presencia de actividad antrópica como las prácticas de pastoreo con animales no nativos: vacuno, ovino y caprino. Adicionalmente, por ser áreas de interés de distintas instituciones en realizar intervenciones para su recuperación.

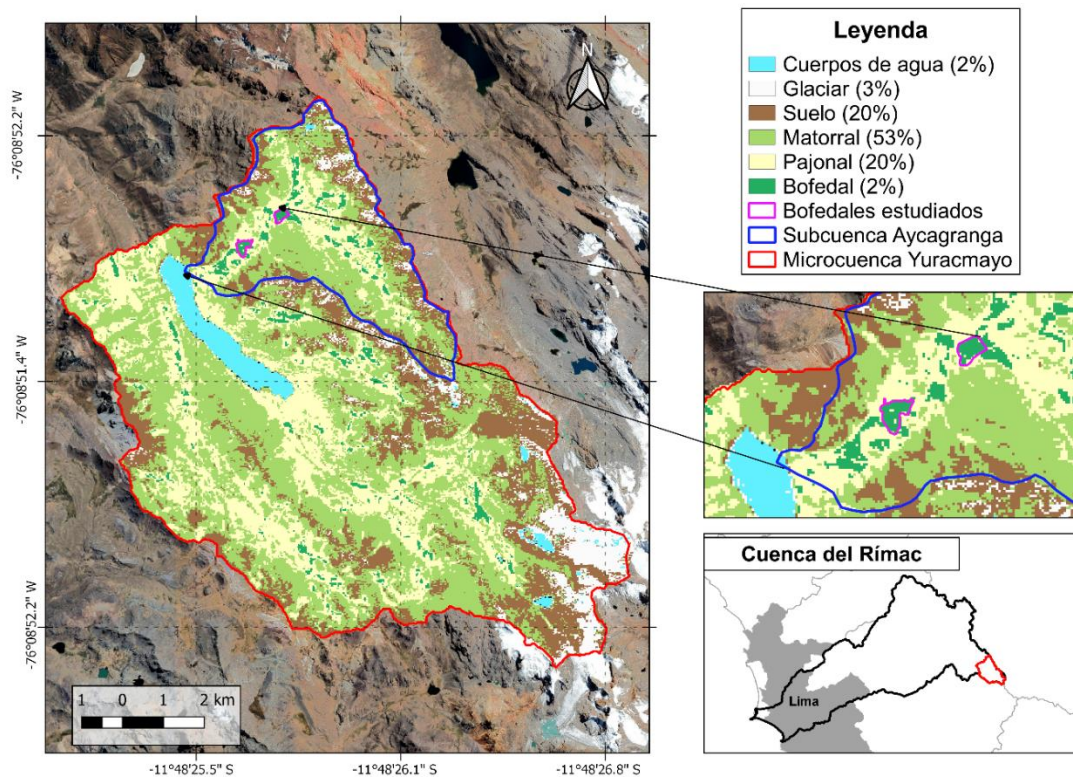


Fig. 3.2. Área de estudio de la investigación

La subcuenca Aycagranga es una unidad hidrológica con aporte a la represa Yuracmayo, y en donde a futuro se espera realizar intervenciones en la IN. Cabe mencionar que el sistema de monitoreo contempla tres componentes a distinta escala. A escala puntual se consideran a las intervenciones proyectadas; a escala micro está la subcuenca Aycagranga y a escala macro está la cuenca Yuracmayo. Dado que no se puede independizar su análisis por la interacción de intervención – cuenca (puntual y macro), el sistema de monitoreo considera distintas técnicas acordes a la escala correspondiente para poder caracterizar la respuesta hidrológica. La **Fig. 3.3** muestra las distintas escalas de análisis del sistema de monitoreo.

Como la microcuenca Yuracmayo es un área poco estudiada y documentada a poca frecuencia, no presenta una red de monitoreo. A modo de ejemplo, es fácil identificar el gran vacío en la densidad de estaciones meteorológicas que se encuentran lejos y alrededor de la zona de estudio, a través de los repositorios web u observatorios de las agencias pertinentes (SENAMHI y ANA). Los datos obtenidos provienen de distintas fuentes como: sensoramiento remoto (imágenes satelitales), productos globales (modelos hidrológicos de reanálisis), productos nacionales (datos hidroclimáticos interpolados) y mediciones in situ (sensores y campañas de campo). La **Fig. 3.3** muestra la resolución espacial de los distintos productos grillados utilizados para la caracterización / monitoreo de la microcuenca Yuracmayo. La poca información disponible es para la reserva Yuracmayo (propiedad de ENEL), con datos de disponibilidad hídrica oficial pero derivada de información del caudal saliente del sistema de vigilancia de la represa.

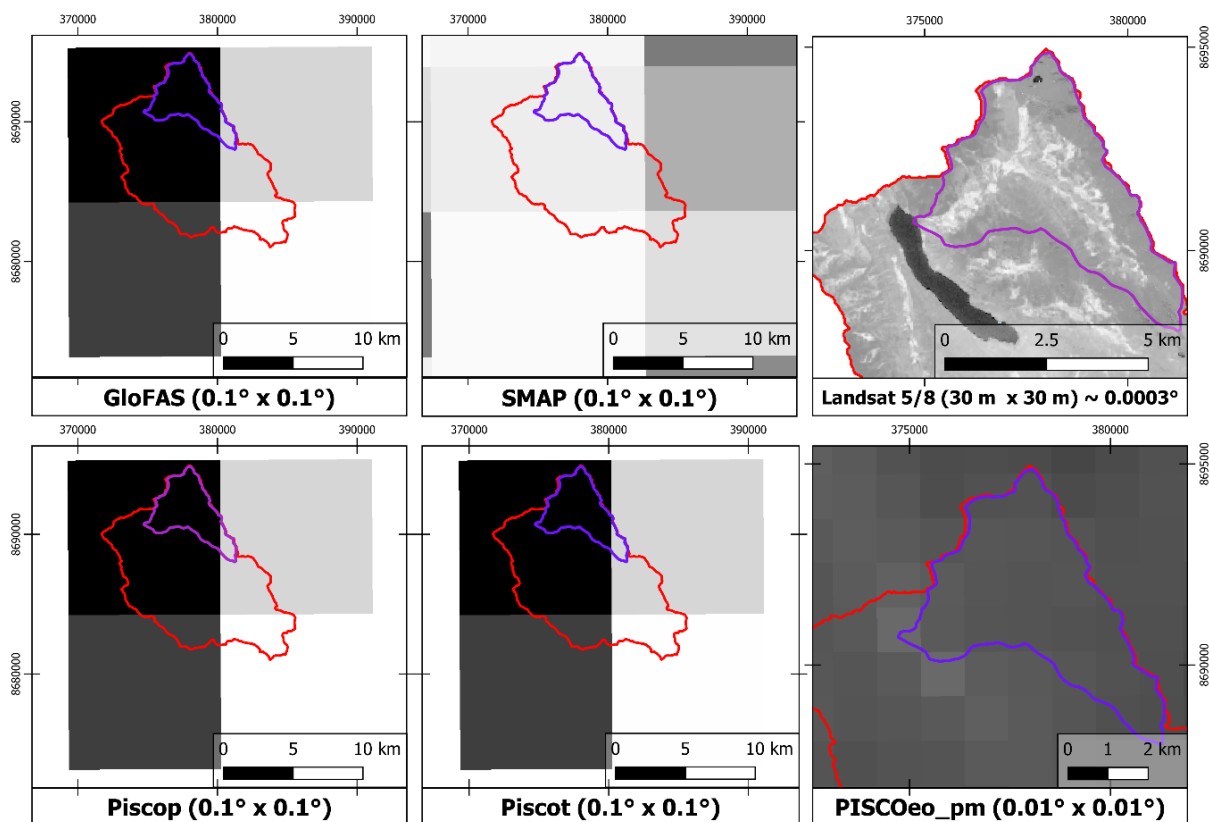


Fig. 3.3. Productos grillados utilizados en la investigación

3.2.2. Caracterización general de la microcuenca

Para poder caracterizar la microcuenca Yuracmayo, una cuenca poco registrada, se identifica tres tipos de características: a) climáticas, b) hidrológicas y c) edáficas y vegetativas. Dado que son escasos los estudios que consideran el análisis de esta cuenca se necesita de datos como los productos grillados, mapas nacionales, imágenes satelitales, entre otra información detallada en la **Tabla 3.1**.

Actividad	Tipo de recurso	Formato	Registro	Resolución espacial	Resolución temporal
Características climáticas	PISCO de precipitación (PISCO Prec v1p1)	NetCDF	1981 - 2016	0.1° x 0.1°	Diaria /mensual
	PISCO de precipitación (PISCO Prec v2p1)	NetCDF	1981 – cercana a la actualidad	0.1° x 0.1°	mensual
	PISCO de evaporación potencial basado en la FAO (PISCOeo_pm)	Shapefile	1981 - 2016	0.01° x 0.01°	Diaria /mensual
	Registro histórico de estación hidrométrica en la salida de la represa	Shapefile	1965 – 2014	Medición puntual	mensual
	Registro histórico de la estación de precipitación Casapalca SENAMHI	CSV	1987 – 2018	Medición puntual	Diaria
	Registro histórico de la estación Matucana	CSV	1964 - 2015	Medición puntual	Diaria
Características edáficas y vegetativas	Imágenes AsterGDEM, (DEM)	GeoTIFF	2008 - 2009	30 m x 30 m	-
	Geología (GE) e hidrogeología (HGE)	Shapefile	2021	Carta Nacional 1:50000	-
	Mapa de humedales (MH)	Shapefile	2012	Mapa de humedales del Perú 1: 100000	-
	Mapa de cobertura vegetal (MCV)	Shapefile	2015	Mapa Nacional de cobertura vegetal 1: 2000000	-
	Mapa de Identificación de Áreas Degradadas (MAIAD)	GeoTIFF	2021	Mapa Nacional de áreas degradadas (30m x 30m)	-
	Mapa de Susceptibilidad Física (MSC)	GeoTIFF	2015	Mapa de Susceptibilidad Física (30m x 30m)	-
	Mapa de Vulnerabilidad Física (MVF)	GeoTIFF	2011	Mapa de vulnerabilidad física (30m x 30m)	-

Tabla 3.1 Recursos de libre acceso para la caracterización de la microcuenca Yuracmayo

Estos recursos permiten la caracterización de la microcuenca Yuracmayo. La metodología para caracterizar las cuencas hidrográficas mediante SIG, y las variables por estimar, han sido adaptados del marco metodológico propuesto para la identificación de cabeceras de cuenca de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) [58], y a la vez considerando

como caso aplicado el diagnóstico de servicios ecosistémicos evaluado en la cuenca del Río Chillón por el MINAM [59].

Características climáticas

La microcuenca Yuracmayo se encuentra entre los 4500 y 4750 m.s.n.m. Su clima es frío y semiárido con temperaturas que fluctúan entre 7.5 y 9.5 °C. Su relieve es abrupto, con altas pendientes, presenta laderas de montañas y áreas con gran probabilidad de movimientos de masa. En la microcuenca existe un periodo de recarga (noviembre a abril) donde la precipitación, los glaciares y las lagunas contribuyen en el almacenamiento de agua en los bofedales, este tipo de cobertura vegetal tiene la capacidad de almacenar el agua y cuando llega a su punto de saturación el agua se descarga a través de infiltración o escorrentía superficial; como resultado contribuyen en almacenamiento de las aguas de la represa en las épocas de estiaje.

Para las condiciones regionales en la cuenca del río Rímac en su totalidad, se tiene un contexto fuerte de antropogenización de los caudales que ayudan a reducir los eventos extremos máximos y regular los eventos extremos mínimos [60]. Asimismo, se tiene un incremento significativo de temperaturas de 0.3 °C/década, una reducción de precipitaciones y un incremento de caudales no significativos [61]

Para determinar las características climáticas: precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial se utiliza el producto grillado PISCO (*Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations*). Para la precipitación se utiliza el producto PISCO de precipitación (PISCO Prec v1p1), para la temperatura el producto PISCO de temperatura (PISCO Temp v1p1) y para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizó el producto grillado de evapotranspiración de referencia basada en FAO Penman-Monteith en Perú (PISCOeo_pm). Para la extracción de PISCO Prec y PISCO Temp se realiza en el software R (ver código en el **Anexo 1**) y para la extracción de PISCOeo_pm se realiza en GEE con el código del **Anexo 2**. Finalmente, se evalúa la tendencia de las características climáticas con el test Mann-Kendall con un valor de significancia de 0.95 para un rango mayor a 30 años (1983 – 2014).

Validación del producto PISCO

Para validar y justificar el uso de los productos PISCO en la microcuenca Yuracmayo se compara los valores registrados por la estación más cercana y que cuente con un gran registro histórico. Además, se validan los resultados a través de indicadores como: Coeficiente de Pearson y NSE.

Precipitación

Para validar el uso del producto PISCOp en Yuracmayo se compara con los datos de la estación Casapalca del SENAMHI, en el periodo de 1981 al 2016. Se compara a escala mensual los datos de la estación con el producto PISCO. En los periodos de no disponibilidad de datos en la estación Casapalca, se procedió a completar con los promedios mensuales para que a nivel anual no varíe la precipitación.

Temperatura

Al igual que en la precipitación, se comparan los resultados de PISCOt para las Temperatura máxima (Tmax.) y Temperatura mínima (Tmín.), con la estación Matucana del SENAMHI, por contar con un amplio registro histórico que va de 1964 al 2015. Se compara los datos de la estación a nivel mensual con los datos de PISCOt por el periodo de 1984 al 2015. En los periodos de no disponibilidad de datos se completa con los promedios mensuales.

Evapotranspiración

A partir de los datos de Tmax y Tmín. de la estación Matucana, se calcula la evapotranspiración potencial mediante el método Hargreaves-Samani para compararlo con los resultados del producto PISCOeo_pm. El método Hargreaves-Samani permite obtener valores diarios en función de la radiación solar extraterrestre diaria (Ra), Tmax, Tmin y Temperatura media (Tmean.). Estos tres últimos datos son de importancia para los cálculos que se presentan a continuación.

Las estimaciones para las evapotranspiraciones no son recomendables emplearlas mediante datos de temperatura; sin embargo, es permitido cuando no se dispone de otros datos. En este sentido, la ecuación Hargreaves-Samani es un método ideal para proporcionar

estimaciones, puesto que cuenta con márgenes de error entre 10 a 15 por ciento o 1mm/día. A partir de ello, se usará la siguiente ecuación:

$$HE = \frac{0.0023(T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}Ra}{\lambda} \dots (3.1)$$

Donde:

He: Evapotranspiración de referencia $\left(\frac{mm}{d}\right)$

Ra: Radiación solar extraterrestre en $MJm^{-2}d^{-1}$

T_{max}, T_{min}: Temperatura del aire diaria máxima y mínima respectivamente

λ: Flujo de calor latente $\left(2.45 \frac{MJ}{kg}\right)$

Test de Mann-Kendall

El test Mann-Kendall es una prueba no-paramétrica, recomendada para evaluar la tendencia en series de datos ambientales, básicamente en la comparación entre los valores que componen una misma serie temporal, en orden secuencial [62]. La estadística del test se presenta a continuación:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \dots (3.2)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_k < 0 \end{cases} \dots (3.3)$$

Donde:

n = número de años

x_j & x_k = valores anuales en los años "j" y "k", j>k respectivamente

Mientras que la varianza de Mann-Kendall se calcula a través de la siguiente expresión.

$$VAR(S) = \frac{1}{18}[n(n-1)(2n+5)] \dots (3.4)$$

Donde la formulación de la hipótesis indica:

$$H_0 = \text{No hay tendencia,} \quad \text{si } S = 0$$

$$H_1 = \text{Tendencia monótona creciente o decreciente,} \quad \text{si } S \neq 0$$

El valor estadístico del test es representado por Z, que se expresa en la siguiente ecuación:

$$z = \begin{cases} \frac{s - 1}{(Var(S))^{1/2}} & \text{si } s > 0 \\ 0 & \text{si } s = 0 \dots (3.5) \\ \frac{s + 1}{(Var(S))^{1/2}} & \text{si } s < 0 \end{cases}$$

La existencia de alguna tendencia creciente o decreciente es evaluada por el valor de Z. Se considera un valor de confianza del 95% y se compara con la descripción de la significancia del test Mann – Kendall para evaluar a mayor detalla la tendencia, como se muestra en la **Tabla 3.2**.

SIGNIFICANCIA	SIMBOLOGÍA	Z
Sin tendencia	ST	0
Tendencia significativa creciente	TSC	> 1.96
Tendencia significativa decreciente	TSD	< -1.96
Tendencia no significativa creciente	TNSC	< +1.96
Tendencia no significativa decreciente	TNSD	>-1.96

Tabla 3.2. Descripción de la significancia del test Mann - Kendall. [63]

Características hidrológicas

Las características hidrológicas: Área y perímetro, forma de la microcuenca, curva hipsométrica, orden de corriente, densidad de drenaje y balance hídrico; se obtiene de la previa delimitación de la microcuenca. A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para la obtención de cada variable.

Forma de la microcuenca

Se determina mediante el índice de Gravelius. Su cálculo se realiza mediante la expresión:

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi * A}} \dots (3.6)$$

Donde:

K_G = Índice de Gravelius

P = Perímetro

A = Área

Curva hipsométrica

Permite conocer la morfometría del relieve de la microcuenca. El cálculo para la obtención se realiza en base a curvas de nivel cada 50 m generadas del recurso DEM con el programa QGIS. La curva hipsométrica se representa en una gráfica de doble entrada de elevación vs área acumulada (%) de la microcuenca.

Orden de corriente

Es el número que tienen una estrecha relación con el número de ramificaciones encontradas en una red de drenaje. Se determinó según el Método de Strahler, para lo cual se necesita los cauces definidos de la capa de la microcuenca. Asimismo, con los datos de la curva hipsométrica y el orden de corriente se realiza el análisis morfométrico del perfil longitudinal del cauce principal.

Densidad de drenaje e hidrográfica

El cálculo de la densidad de drenaje se realiza mediante la expresión:

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \dots (3.7)$$

Donde:

D_d : Densidad de drenaje de la microcuenca (km^{-1})

$\sum L_i$: Suma de las longitudes de los cursos de agua que conforman la microcuenca (km)

A: Área de la cuenca (km^2)

Por otro lado, para el cálculo de la densidad hidrográfica (F) se utiliza la siguiente expresión.

$$F = \frac{\sum N_i}{A} \dots (3.8)$$

Donde:

F : Densidad hidrográfica

$\sum N_i$: Número de cursos de agua de todos los órdenes

A: Área de la cuenca (km^2)

Tiempo de concentración

Se calcula el tiempo de concentración por el método de Kirpich a través de las siguientes expresiones:

$$T_C = 0.0195L^{0.77}S^{-0.385}(\text{Kirpich}) \dots (3.9)$$

Donde:

T_C : Tiempo de concentración (min).

L : Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida (m).

S : Pendiente promedio de la cuenca (m/m)

Balance hídrico

Para el balance hídrico estacional medio se utiliza los datos de PISCO de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP) representados en una misma gráfica de serie de

tiempo que compara la diferencia de la estacionalidad de la cuenca en los meses de superávit (mayor P) y déficit (mayor ETP).

Caudal

Para el caso de los caudales, el producto PISCO-Hym-GR2M a la fecha no ofrece una resolución óptima para los valores de interés (caudales de ingreso a la represa), por lo que se opta por utilizar información de los caudales naturalizados de ingreso al sistema Yuracmayo del Comité de Operaciones Económica del Sistema Interconectado Nacional (COES).

La represa Yuracmayo inició operaciones en el año 1995, por lo cual se calcula los caudales naturales de ingreso a la represa, como se detalla con la siguiente ecuación:

$$Q_{n\ Yurac} = Q_r + Q_f + \frac{\Delta V}{\Delta t} + \frac{A * [C * E + P * (C_E - 1)]}{\Delta t} + Q_{reb} \dots (3.10)$$

Donde:

$Q_{n\ Yurac}$ = Caudal natural de la cuenca en embalse Yuracmayo (m³/s)

Q_r = Caudal descargado por el embalse (m³/s)

Q_f = Caudal de filtraciones a través del cuerpo de la represa (m³/s)

Q_{reb} = Caudal de rebose por el aliviadero del embalse (m³/s)

C_E = Coeficiente de escorrentía

C = Coeficiente de evaporación

P = Precipitación sobre el vaso del embalse (mm)

A = Área del vaso del embalse (km²)

ΔV = Diferencia de volumen acumulado en el embalse para el intervalo (hm³)

Δt = Intervalo de tiempo (s)

El desarrollo de esta ecuación para la obtención del registro de caudales naturalizado en la represa Yuracmayo se puede consultar en [64]

Características edáficas y vegetativas:

Geología, topografía y pendiente.

La geología se evaluará a partir de mapas nacionales y la delimitación de la capa de la microcuenca, de esta manera se identificará las principales unidades geológicas que contiene. Con respecto a la topografía y pendiente, con imágenes ASTER GDEM (Aster y el programa QGIS se elaborará un mapa de pendientes (%).

Características de vegetación:

Corresponden a las coberturas que contribuyen a la captación y percolación de la precipitación. A partir del mapa hidrogeológico nacional y la delimitación de la microcuenca, se identifica las áreas cuyos componentes hidrogeológicos estén conformados por acuíferos con permeabilidad media o alta.

3.2.3. Monitoreo de los bofedales a escala de cuenca mediante SIG

Para este apartado las variables biofísicas a considerarse son las que se relacionan con la cobertura vegetal y suelo: humedad de suelo y cobertura del bofedal. La extensión de cobertura del bofedal se realizará mediante el uso del índice NDVI. Respecto a la cobertura temporal se analizará las series de tiempo de las variables biofísicas desde el año 1991 hasta 2020 teniendo un periodo de análisis de 30 años.

Humedad del suelo

Se considera esta variable para conocer el contenido de agua en el suelo, y su importancia para que los bofedales puedan existir. Entre los productos de libre acceso están los datos SMAP, SMOS y GLDAS. Se emplea los datos SMAP por presentar una mejor resolución espacial (9km) y temporal (3 días) respecto a los otros productos mencionados. Detalles del producto SMAP se especifican en la **Tabla 3.3**. Los datos SMAP se accederán mediante el Catálogo de datos de GEE y se procesan en esa misma plataforma (ver **Anexo 3**).

Recurso	Resolución espacial	Cobertura temporal	Parámetros
SMAP L3	10 km x 10 km	2015-04-02 - presente	Humedad del suelo superficial y subterráneo (mm), perfil de humedad del suelo (%), anomalías de humedad del suelo superficial y subterráneo (-).

Tabla 3.3. Descripción del producto SMAP.

Extensión de bofedales

Se halla la extensión de cobertura del bofedal mediante el uso del índice NDVI, que se calcula con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots (3.11)$$

Donde:

NIR: Banda infrarrojo cercano del satélite

RED: Banda roja

Respecto a la cobertura temporal se analizará las series de tiempo de las variables del año 1991 hasta 2020 teniendo un periodo de análisis de 30 años. Se utilizarán las series de reflectancia superficial que se obtienen del catálogo de imágenes de GEE de la colección: LANDSAT/LC08/C01/T1_SR y LANDSAT/LC05/C01/T1_SR utilizando el algoritmo que se muestra en la **Fig. 3.4**.

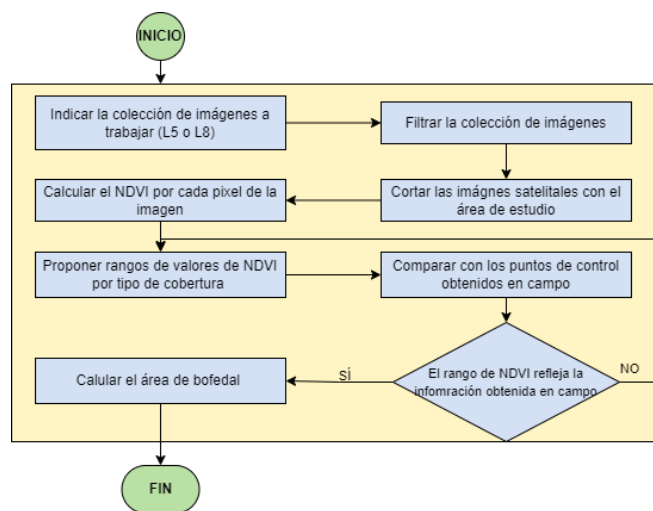


Fig. 3.4. Algoritmo utilizado para el cálculo de extensión de bofedales.

Se utiliza ambas colecciones de catálogos de imágenes de Landsat 5 y 8 dado que cubren el periodo a analizar (1990-2021) y porque este conjunto de datos está procesado a reflectancia superficial, ortorrectificada y corregida atmosféricamente (ver **Anexo 4**). Además, cuentan con una resolución espacial aceptable (30 m x 30 m).

3.2.4. Monitoreo de variables hidrológicas y biofísicas en la subcuenca Aycagrange

Las técnicas de monitoreo para este apartado se basarán de métodos in situ, dado que el monitoreo se dará a escala puntual (intervenciones específicas), y demanda una resolución espacial alta.

Variables hidrológicas

Caudal

Para estimar el caudal aportante de la subcuenca Aycagrange a la represa se utiliza la información proveída por el Sistema de Previsión de Inundaciones Globales (GloFAS), específicamente el recurso GLOFAS-ERA5 [48], el cual ofrece caudales diarios operacionales a una resolución de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ desde 1979 hasta la actualidad y representa las salidas de un modelo de reanálisis hidrológico. Para recopilar los caudales de Aycagrange se extrae el caudal correspondiente a la grilla que encierra a la subcuenca, se considera que el caudal es proporcional al área de aporte, y el factor a multiplicar será la razón entre el parámetro: *Upstream area* y las dimensiones de la cuenca Yuracmayo. La extracción de los datos grillados se realizó con el lenguaje Python por su facilidad de leer archivos grib (ver **Anexo 5**).

Se aplicó una corrección a los datos GloFAS en función de los datos observados, basada en un método de reducción de escala espacial estadístico del tipo multiplicativo para los Andes del Perú [65]. Este método puede ser aplicable a diversos productos satelitales o de reanálisis en zonas climáticamente homogéneas, es decir en regiones que no presenten evento extremos o sesgos que alteren los factores multiplicativos. El método se encuentra implementado en el paquete hydRopclim del sistema R [66]. Las series de tiempo obtenidas a nivel mensual se comparan con la información de caudales del COES para Aycagrange, y se evalúan los estadísticos: NSE, RMSE y el Sesgo porcentual (PBIAS) y la relación entre

RMSE y la desviación estándar (RSR). Indicadores comúnmente utilizados para la evaluación de series hidrológicas simuladas y observadas [52]

Variables biofísicas

Capacidad de Campo (CC), punto de marchitez (PM) y porcentaje de materia orgánica (%MO)

Para el cálculo de las variables de CC, PM y %MO se tomaron muestras de suelo de bofedal y se realizó las pruebas en un laboratorio certificado. Adicionalmente, se midió la textura del suelo para conocer las clases estructurales que lo conforman, esta variable se calculó con el procedimiento de Bouyoucos a través del método AS-09. Para la CC y PM se realizó en base a la metodología de (Smith, 1951), y para el %MO se realizó a través de método AS-07 de Walkley-Black (1965).

Tasa de infiltración (TI) y conductividad hidráulica vertical (K_v)

Se realizaron mediciones in situ de la infiltración con un infiltrómetro de minidisco de succión de la marca *METER Group*. La practicidad de utilizar este tipo de infiltrómetro en campo fue el principal motivo de su uso, dado que el ingreso de agua es desde la superficie a un reservorio graduado (ver **Fig.3.5.**). Dado que los diferentes tipos de suelo infiltran agua a diferentes velocidades, la velocidad de succión del infiltrómetro debe ajustarse a través del tubo de control de succión. Una recomendación general para todo tipo de los suelos, y la utilizada para todas las pruebas fue a una tasa de succión de 2 cm.

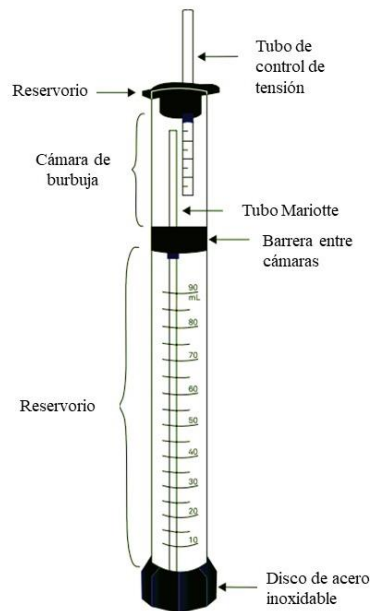


Fig. 3.5. Componentes del infiltrómetro minidisco [67]

Los resultados in situ que nos da el infiltrómetro es la tasa de infiltración promedio (TI) obtenidas a través del promedio de las columnas de agua infiltradas en un paso de tiempo. Para el cálculo de la conductividad hidráulica vertical (K_v) se basa en la ecuación propuesta por [68] los parámetros de Van Genuchten para las 12 clases de textura se obtuvieron de [69]. El cálculo de K_v se halló a través del *spreadsheet* del infiltrómetro utilizado, donde también proporciona gráficas de curva de la infiltración acumulada frente a la raíz cuadrada del tiempo.

3.2.5. Indicadores del sistema de monitoreo desarrollado

Como se mencionó anteriormente el sistema de monitoreo planteado tiene el objetivo de formar parte de un sistema de monitoreo completo dado que el impacto aún no ha ocurrido, pero se conocen las posibles intervenciones, toma en consideración variables e indicadores que pueden considerarse en un futuro para conocer el verdadero impacto de las intervenciones. El siguiente conjunto de indicadores, que también podrán ser considerados como indicadores de rendimiento, toman en consideración la interacción de las condiciones

hidrológicas y las intervenciones. La **Tabla 3.4** muestra el conjunto de indicadores a evaluarse.

Indicadores sugeridos	Método / fórmula	Unidades	Escala OEI	Fuente
Infiltración de agua en bofedales	Cálculo de la conductividad hidráulica vertical (Kv) por el método de método Zhang (1997) a través de las curvas de duración obtenidas del infiltrómetro minidisco en condiciones no saturadas.	mm/h	Puntual	Propuesto
Contenido de materia orgánica en bofedales	Medición del %MO de muestras de cobertura bofedal.	%	Puntual	Propuesto
Caudal mensual de salida de bofedales	Caudal posprocesado del modelo GloFAS corregidos con caudales naturalizados de ingreso a la represa.	m ³ /s	Micro	Propuesto
Índice de Regulación Hídrica (IRH)	Volumen por debajo del percentil 50 de caudal (Q ₅₀) en la curva de duración de caudales dividido entre el volumen total $\Sigma(Q_{Q<Q50})/\Sigma(Q)$	-	Micro	IDEAM (2018)
SINDEX	Índice de estacionalidad. $SINDEX = (1/P_{anual})(\Sigma P_{mes}-P_{anual} /12)(6/11)$	-	Micro / macro	Ochoa-Tocachi et al. (2016)
R2FDC	Índice de Pendiente del tercio medio de la curva de duración de caudales en escala logarítmica $R2FDC = (\log_{10}(Q_{66})-\log_{10}(Q_{33}))/ (0.66-0.33)$	-	Micro / macro	Ochoa-Tocachi et al. (2016)
RR	Relación entre el volumen de caudal anual promedio y el volumen de lluvias anual promedio $RR = Q_{anual}/P_{anual}$	-	Micro / macro	Adaptado de Ochoa-Tocachi et al. (2016)
Variación de balance hídrico (BH) en Yuracmayo	Diferencia entre la precipitación y evapotranspiración potencial (mensual y anual) $BH_{anual} = P_{anual}-ETP_{anual}$ $BH_{mes} = P_{mes}-ETP_{mes}$	mm/año	Micro / macro	Propuesto
Variación del área de los bofedales	Extensión anual de bofedales en Aycagranga y Yuracmayo en época seca (junio, julio y agosto). $NDVI = (NIR-Red) / (NIR+Red) > 0.60$	km ²	Micro / macro	Propuesto

Tabla 3.4. Indicadores propuestos del sistema de monitoreo

Conductividad hidráulica vertical en bofedales

La conductividad hidráulica indica qué tan rápido se infiltra el agua en un tipo de suelo determinado. Es de importancia por la recarga de agua subterráneas y la sostenibilidad de los ecosistemas. Puede ocurrir en condiciones saturadas y no saturadas. Este indicador es a una escala puntual importante porque un bofedal con mayor capacidad de infiltración o tasa de infiltración permitirá que mayores volúmenes de agua se almacenen en estos. Se limita a ser una medición puntual como puede llegar a ser con el uso de sensores electrónicos.

Contenido de Materia orgánica en bofedales

El %MO refleja la capacidad de acumulación de carbono que tiene la turba. Es de importancia dado que un bajo contenido de MO se relaciona con un estado degradado de la

cobertura. Es de fácil medición ya que se procede a colecta de una muestra de suelo en campo y se realiza el ensayo en algún laboratorio certificado. Una limitante es encontrar algún punto representativo de bofedal, ya que los resultados pueden variar espacialmente como verticalmente.

Caudal mensual de salida de bofedales

Este indicador hace referencia a la medición del caudal de salida aportante de los bofedales a la quebrada principal. Se realiza mediante el posprocesamiento del producto grillado de caudales GloFAS. Entre sus ventajas está que, al ser un producto grillado, podemos tener caudales mensuales en un gran registro histórico, entre las limitantes es que se necesita data de caudales observados para su validación.

IRH, SINDX, R2FDC y RR

En la literatura existen índices hidrológicos como el IRH, SINDX, R2FDC y RR que representan la capacidad de regulación de las cuencas. Si bien es cierto no permiten una interpretación directa en términos de agua (cuantificación de volúmenes), puede utilizarse para complementar el análisis de la capacidad reguladora de la cuenca a través de la relación de otras variables como caudal, precipitación y evapotranspiración potencial.

Variación del balance hídrico (BH) en Yuracmayo

Este indicador considera si la recarga por precipitaciones ha sido suficiente para compensar la evapotranspiración potencial de la cuenca. De esta manera se identifica si ha habido un superávit o déficit hídrico en el periodo analizado (mensual o anual). Una de las limitaciones es que se estaría considerando como única recarga para la cuenca a las precipitaciones y exceptuando otra fuentes de ingreso que puedan cubrir la demanda de agua por la cobertura vegetal.

Variación del área de los bofedales

La cuantificación del área de bofedales en los meses más secos (junio, julio y agosto) permite identificar la variación espacial de los bofedales perennes en la cuenca. Este indicador alertaría si se está aumentando o disminuyendo la cobertura de bofedales en la cuenca.

Una de las principales limitaciones es la precisión en la cuantificación del área de bofedales, dado que se realiza a partir de imágenes satelitales con resolución de 30x30m, además que pueda haber indisponibilidad de imágenes por presencia de nubosidad u otros factores en el periodo analizado.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados, análisis e interpretación realizados a partir de la información recolectada a través de tecnologías de EO, así como mediciones en campo. Los resultados se muestran divididos por cada objetivo y se obtuvieron secuencialmente para el análisis final del sistema de monitoreo a través del desarrollo de indicadores

4.1. Caracterización de variables biofísicas

En este primer objetivo específico se muestran los resultados de la caracterización de la microcuenca Yuracmayo divididos en tres secciones: características hidrológicas, climáticas y, edáficas y vegetativas.

4.1.1. Características hidrológicas

Como descripción general de la cuenca en la **Tabla 4.1** se muestra las características hidromorfológicas e hidrológicas halladas para la cuenca de estudio, así como la subcuenca Aycagranga.

Nombre de variable hidrológica	Microcuenca Yuracmayo
Área (km ²)	$A_{Yuracmayo} = 98.88$ $A_{Aycagranga} = 18.85$ $A_{bofedales} = 1.38$
Forma (kc)	La microcuenca posee una forma Oval oblonga con un valor de kc igual a 1.49.
Balance hídrico	Diciembre – marzo (superávit hídrico) Abril – diciembre (déficit)
Tiempo de concentración (min)	Con una longitud principal del río de 8.85 km y una pendiente de 0.08 m/m se obtiene un tiempo de concentración por el método de Kirpich de: $T_c = 56.43$ min.
Densidad de drenaje (Dd), red hídrica (F)	Dd= 1.86 (moderada), F = 0.96 (moderada)
Áreas degradadas (Ad), % pendiente media (% pm), Áreas de peligros de movimiento de masa (%pmm)	Ad = 0.52 km ² Pm = 21.12%, Pmm= 68%

Tabla 4.1. Características hidrológicas en la microcuenca Yuracmayo

Como muestran los resultados, la microcuenca Yuracmayo tiene una forma Oval oblonga, por esta forma rectangular y alargada presenta cierta baja susceptibilidad a las avenidas torrenciales que al final sería el agua de ingreso a la represa. Asimismo, presenta una densidad de drenaje y una red hídrica moderada, lo cual favorece la baja susceptibilidad de avenidas frente a eventos de tormenta. Cabe mencionar que al tener tiempos de concentración mayores (56 min.) implica un mayor tiempo en que la cuenca alcance su máxima concentración del agua. Se efectuó un balance hídrico con datos obtenidos de la caracterización climática (ver **Fig. 4.1**) con fines de visualización de la época húmeda y seca ante la ausencia de caudales medios en la subcuencas Aycagranga y Yuracmayo. El balance mostró una fuerte estacionalidad, marcada por meses de superávit de diciembre a marzo, y meses de déficit de abril a diciembre.

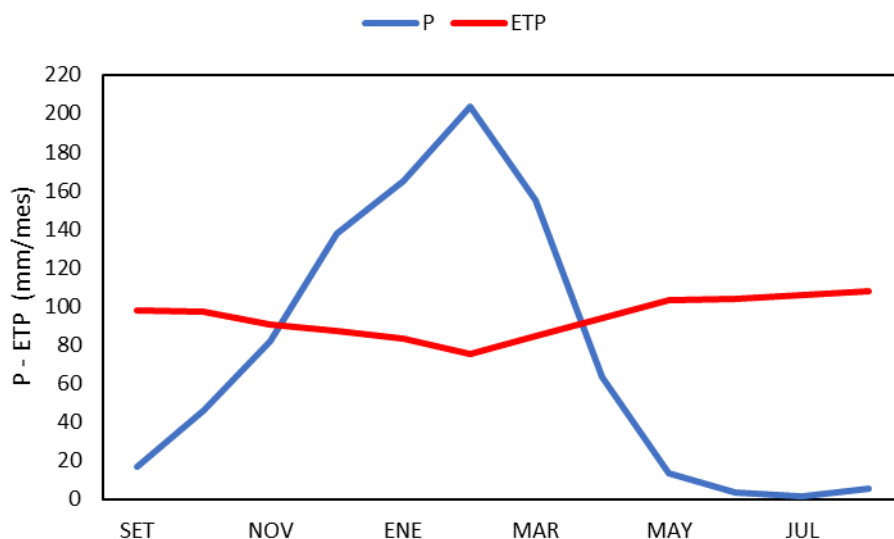


Fig. 4.1. Balance hidrológico medio en Yuracmayo.

Como muestra la figura, se alcanza un valor máximo de precipitación mensual (P) en febrero y valores mínimos de evapotranspiración potencial mensual (ETP) en los meses de julio y agosto. En los meses donde existe un superávit hídrico significa que la cobertura vegetal suple su demanda de agua a través de las precipitaciones, pero en los meses de déficit hídrico, la recarga de las precipitaciones no es suficiente, y necesita de otras fuentes de agua

si se quiere asegurar la demanda hídrica de la cuenca. Respecto a la curva hipsométrica, esta se muestra en la **Fig. 4.2**.

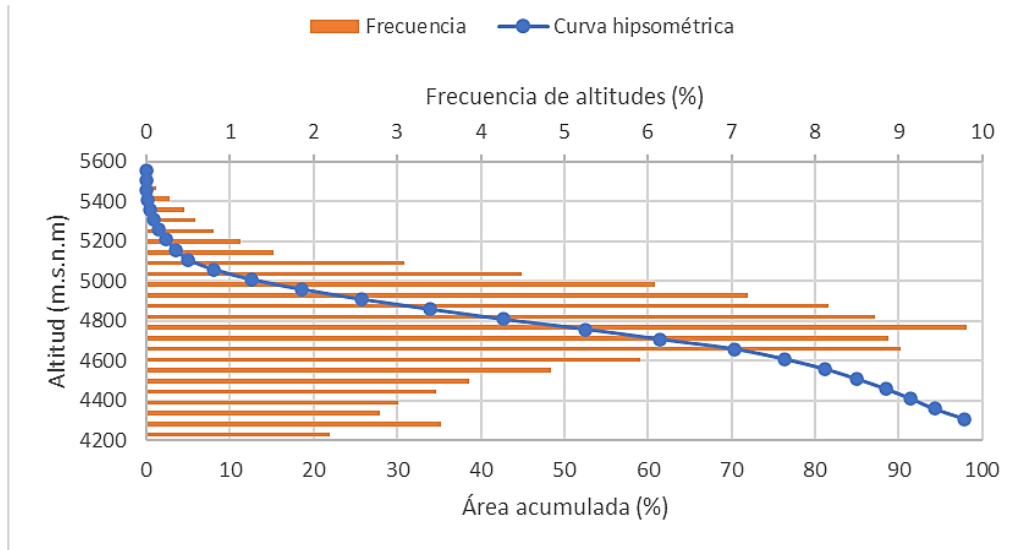


Fig. 4.2. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes en Yuracmayo.

Basándonos en la **Fig. 4.2** se muestra una curva en forma de “S”, estas curvas sinusoidales caracterizan a las cuencas en un estado de madurez o etapa de equilibrio con una concavidad en la cuenca alta, que implica un potencial erosivo relacionado a proceso de pérdida de cobertura vegetal o procesos de erosión. Estos procesos se darían en la parte alta ya que como se muestra en la figura a una altitud mayor a 5000 m.s.n.m tenemos el 30% del área de la cuenca.

4.1.2. Características climáticas

Validación del productos PISCO (P, T y ETP)

Para la precipitación se compararon los datos registrados por la estación Casapalca y los datos del producto PISCOpv1 en un periodo de casi 30 años (1988 al 2016) limitado por el registro histórico de ambos. La **Fig. 4.3**, muestra la distribución espacial del coeficiente de determinación, obteniéndose un desempeño bueno con valor de $R^2 = 0.77$.

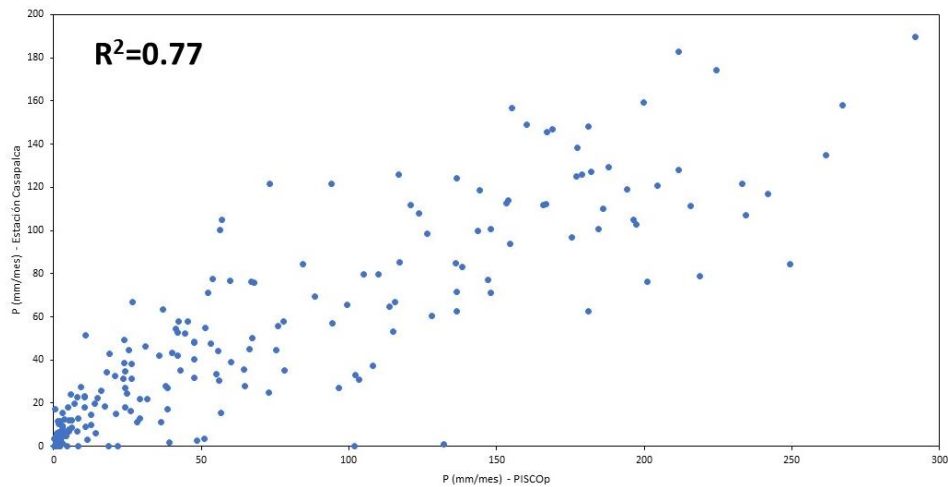


Fig. 4.3. Correlación entre la precipitación estación Casapalca vs PISCOp (1988 – 2016).

Como presenta la **Fig. 4.3** se obtiene una correlación positiva alta entre ambos conjuntos de datos mensuales, a nivel interanual presenta un desempeño medio con una correlación media $R^2=0.50$, y a nivel estacional el producto PISCOp logra representar la estacionalidad identificando los meses más húmedos y secos.

Respecto a la temperatura, la estación Matucana registra tanto la $T_{máx}$ y $T_{mín}$, al igual que el producto PISCOt, por ello se comparó ambos conjuntos de datos a través de la distribución espacial del coeficiente de determinación como muestra la **Fig.4.4**.

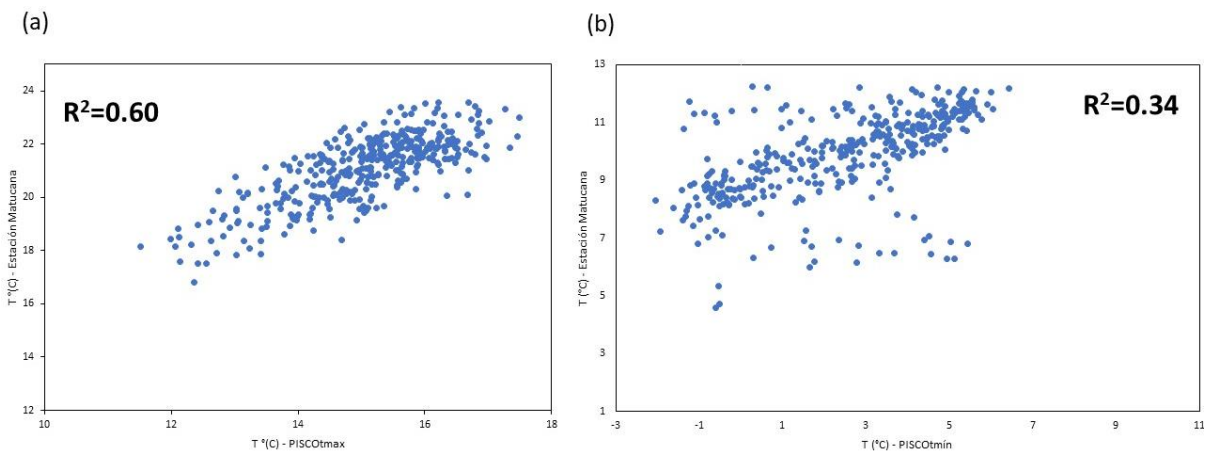


Fig. 4.4. Correlación entre la temperatura estación Matucana vs PISCOt (1984 – 2015).

A nivel mensual se encontraron niveles de correlación medio y alto, con valores de $R^2=0.34$ para la $T_{mín}$, y $R^2=0.60$ para la $T_{máx}$. En general, los resultados aceptables se deben

a que PISCOt si logra representar los patrones de puntos máximos y mínimos a nivel mensual, más no en la magnitud. Esto es más evidente para la $T_{mín}$, donde existen meses más fríos, que alcanzan valores por debajo de 0° C que son identificados por el producto PISCOt mas no por la estación. A escala interanual se obtienen valores desfavorables del desempeño, con resultados de $R^2 \approx 0.01$ para la $T_{mín}$, y $R^2 = 0.56$ para la $T_{máx}$, a nivel anual los datos presentan una menor correlación por los picos registrados por la estación Matucana, mientras que los promedios anuales modelados por PISCO no presentan fluctuaciones abruptas. Uno de los factores que ocasiona la diferencias entre los conjuntos de datos es que la estación Matucana está alejada al área de estudio, y no podría representar características de la microcuenca Yuracmayo, tales como ser una microcuenca altoandina con presencia glaciario el cual se ha venido reduciendo en las última décadas [56] y [57].

Respecto a la ETP, dado que se no se cuenta con una estación que mida esta variable se estima la ETP por el método Hargreaves-Samani, con los datos de $T_{máx}$. y $T_{mín}$. anteriormente hallados, y se evalúa con los datos de PISCOeo_pm. **La Fig. 4.5** muestra el diagrama de dispersión del coeficiente de determinación ambos conjuntos de datos.

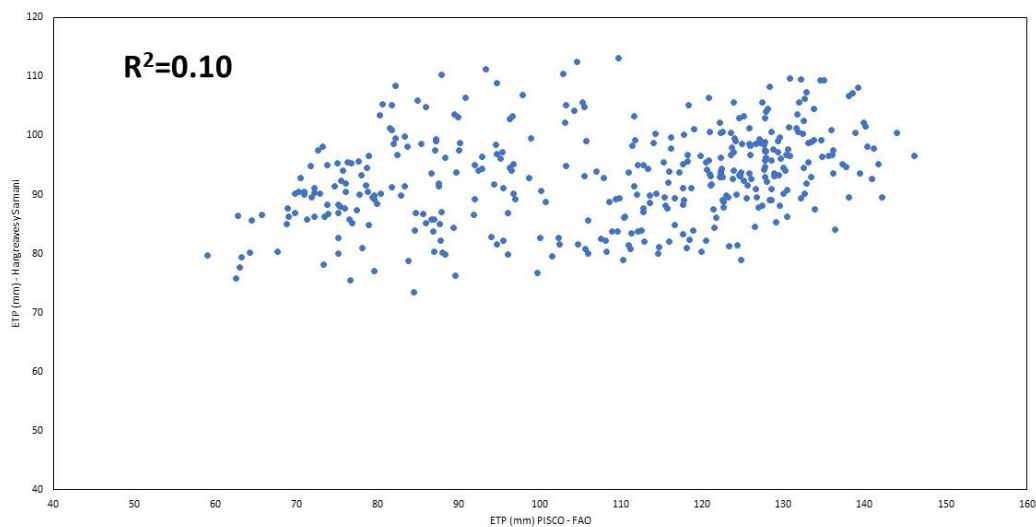


Fig. 4.5. Correlación entre la evapotranspiración potencial Hargreaves-Samani vs PISCOeo (1984 – 2015).

Los datos mensuales presentan una correlación mínima $R^2 = 0.10$, al igual que la temperatura, la principal diferencia es la magnitud, mas no la representación del patrón de la serie mensual. La correlación mejora a una escala interanual $R^2 = 0.37$ evidenciándose un

incremento de la ETP anual con el pasar de los años. A nivel estacional el ETP hallado por el método Hargreaves-Samani presenta una mejor tendencia correspondiente al año hidrológico, con valores máximos a inicios de septiembre y finales de agosto; y mínimos de enero a marzo.

Resultados de este apartado demostraron que se encontraron correlaciones bajas (ETP), medias ($T_{mín}$ y $T_{máx}$) y altas (P) a base de re-cálculo del coeficiente de determinación entre los datos de PISCO con mediciones observadas a escala mensual. A escala interanual los escenarios mejoran para la ETP, y para las demás variables se mantienen en un nivel de correlación medio ($R^2 \approx 0.50$), a excepción de la $T_{mín}$ que alcanza un valor mínimo a causa de que en la mayoría de casos el producto PISCOt no registra valores mínimos ($< 0 \text{ }^\circ\text{C}$) En tal sentido, el siguiente apartado se basa en una análisis interanual utilizando en su mayoría los productos PISCO para P, ETP y T; y se evalúa las tendencias de estas series.

Evaluación de las series climáticas

Uno de los principales peligros identificados para la función reguladora de los bofedales, es la variación climática. La **Fig. 4.6** muestra las series de tiempo de variaciones interanuales de las características climáticas para la precipitación, evapotranspiración potencial y temperatura, donde a simple vista se identifica una tendencia creciente **Fig. 4.6 (a-c)** y decreciente para la serie de caudal **Fig. 4.6 (d)**.

Series interanuales climáticas en Yuracmayo (1983 – 2014)

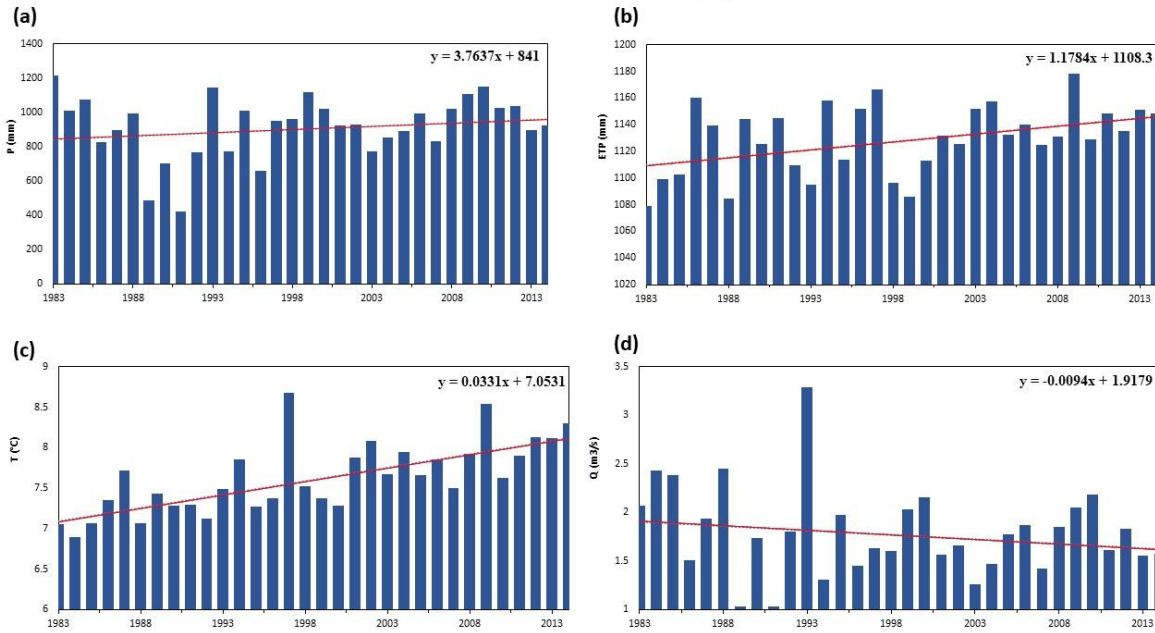


Fig. 4.6. Series de tiempo interanuales de (a) precipitación, (b) evapotranspiración de referencia, (c) temperatura y (d) caudal naturalizado.

La **Tabla 4.2** muestra el valor de las tendencias y su significancia en base al test Mann – Kendall para cada serie, en un mismo periodo analizado (1984 al 2014) y para todo el registro histórico disponible. Las tendencias demuestran escenarios desfavorables de los efectos del cambio climático a escala local. Para la temperatura se halló un incremento anual de $+0.03\text{ }^{\circ}\text{C/año}$ y una variación de $+0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década (1990 -2010) para la microcuenca Yuracmayo, este calentamiento continuo se refleja en otros estudios de escala regional, como en [61] para las cuencas del Pacífico peruano donde se halló un valor de $+0.2\text{ }^{\circ}\text{C/década}$ y para las cuencas occidentales de los andes tropicales con un valor de $0.13\text{ }^{\circ}\text{C/década}$. En [70] se encontró que el impacto del calentamiento global en la temperatura de zonas altoandinas centrales más altas ha experimentado un calentamiento continuo. Posiblemente originado por factores como la deforestación, la urbanización o el cambio de uso del suelo en general. En tal sentido, se atribuyen la causa del aumento de temperaturas a factores antropogénicos, por lo que se debe aplicar medidas que protegen y conserven los ecosistemas presentes en la cuenca.

	(1983 - 2014) Z-statistic	Significancia	Cambio anual	Registro histórico Z-statistic	Significancia
P	1.09	Tendencia no significativa creciente	+3.76 mm/año	1981 - 2026 0.80	Tendencia no significativa creciente
ETP	3.58	Tendencia significativa creciente	+1.18 mm/año	1981 - 2016 3.34	Tendencia significativa creciente
T	4.62	Tendencia significativa creciente	+0.03 °C/año	1981 - 2016 4.72	Tendencia significativa creciente
Q	-0.54	Tendencia no significativa decreciente	-0.01 m ³ .s ⁻¹ /año	1965 - 2014 -3.60	Tendencia significativa decreciente

Tabla 4.2. Tendencias de las características climáticas en base al test Mann – Kendall

La tendencia significativa creciente para la temperatura ($Z=4.20$) y evapotranspiración potencial ($Z=3.58$) implicaría una mayor demanda del agua para la cobertura vegetal, específicamente para los bofedales.

Por otro lado, para la precipitación se tiene un incremento anual de 3.76 mm/año que representa una débil tendencia creciente en los valores de precipitación ($Z=1.09$). Otras investigaciones encontraron una tendencia significativa creciente para toda la parta alta de la cuenca del río Rímac en el período de 1964 a 2013, en contraste, también se encontró una tendencia negativa significativa para el período que va de 1969 a 2004 reportada por [71] en la parte baja de la cuenca del Rímac. Estos resultados demuestran la fuerte variabilidad interanual de las zonas altoandinas y cómo pueden influir en la señal de la tendencia. El aumento de las precipitaciones en el periodo de 1983 al 2014 es favorable para la recarga de la cuenca. Por otro lado, en base al registro PISCO Prec v2p1, un nuevo conjunto de datos de precipitaciones grilladas que va desde 1984 a la actualidad (con una latencia de 8 semanas), se encontró que en el periodo del 2016 al 2021 se presenta una disminución de las precipitaciones anuales con una tendencia decreciente media a razón de 18 mm/año, lo que conllevaría un menor almacenamiento y recarga de agua para los bofedales. Cabe mencionar que del registro analizado en la investigación del 1984 al 2016, se evidenció que las precipitaciones anuales máximas responden a eventos El Niño principalmente durante los episodios extremos (1982/83 y 1997/98).

La capacidad de descarga de la cuenca Yuracmayo a la represa se viene reduciendo anualmente ($\sim 0.01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{año}$), la fuerte tendencia decreciente ($Z=-0.54$) de los caudales ingresantes a la represa significaría que cada vez se aporta menos y que se estaría

disminuyendo la capacidad aportante de la cuenca. A pesar de contar con un aumento de la precipitación entre los años de 1983 al 2014 también se ha presentado la pérdida de cobertura glaciaria en la parte alta de la cuenca. El glaciar Paccha se redujo en 0.04 km^2 su cobertura de 1988 al 2013 [57] y el glaciar Sullcón [56] ha perdido en su frente glaciar 226.57 m desde el 2001 al 2016, ello puede ser un indicador de que la pérdida de glaciares en Yuracmayo ha afectado la recarga de la represa.

Por último, cabe analizar los efectos climáticos que originó la construcción de la represa en Yuracmayo. Se evalúa dos periodos: 1983 – 1991 y 1994 – 2014, los años no considerados son el periodo de construcción de la represa 1991 al 1994. Respecto a la precipitación, se aumentó su intensidad media anual, mientras que antes se tenía un valor de 831 mm/año , luego de la construcción de la represa se obtiene un valor de 930 mm/año , además en el primer periodo se tenía una tendencia decreciente a razón de -85 mm/año , en cambio para el segundo periodo se cuenta con una tendencia creciente de $+6 \text{ mm/año}$. Para la temperatura y evapotranspiración potencial causó un efecto contrario, la presencia de la represa disminuyó ligeramente su razón de crecimiento anual, y para los caudales de salida de la cuenca se obtuvo un efecto amortiguador, donde en el primer periodo se tenía una tendencia decreciente de $-0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{año}$, luego de la construcción de la represa se obtiene un valor de $+0.005 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} / \text{año}$. En resumen, la construcción de la represa aumentó la intensidad y los patrones de lluvia en Yuracmayo, y a la vez amortiguaron la pérdida de caudales que se presentaba anualmente en la cuenca.

4.1.3. Características edáficas y vegetativas

Respecto a las características edáficas y vegetativas para nuestra área de estudio y en general para la cuenca del río Rímac no se cuenta con información a detalle como una zonificación forestal que delimite las tierras forestales o el uso de suelo recomendado para el tipo de ecosistema. Pero a partir de productos grillados y globales se pueden identificar zonas de priorización e interés para proyectos de inversión como muestra la **Fig. 4.7**. La figura muestra que en más del 50% de la microcuenca Yuracmayo existe una muy alta susceptibilidad a los movimientos de masa. En estos lugares se presentan zonas con masas

de rocas intensamente meteorizadas, saturadas y muy fracturadas; con discontinuidades desfavorables, depósitos superficiales no consolidados. Asimismo, se superpone las capas del Mapa de Áreas Degradadas elaborado por el MINAM, se evidencia tres zonas con degradación, de las cuales una coincide con uno de los bofedales analizados, estas zonas son consideradas degradadas ya sea por la pérdida total o parcial de algunos de sus componentes esenciales (agua, suelo y especies). Por último, dado que el área no cuenta con alguna Zonificación Forestal se realiza un ejercicio rápido para la elaboración de esta basándose en la metodología detallada en la Guía Metodológica para la Zonificación Forestal propuesta por el SERFOR. Como principales atributos se considera el Mapa de Ecosistemas y Mapa de pendientes. Los resultados se muestran en la **Fig. 4.7-b** donde se obtiene que gran parte de la microcuenca Yuracmayo pertenece a una Zona de Tratamiento Especial, es decir, zonas destinadas a Zonas de producción agroforestal, y Asociaciones Vegetales No Boscosas.

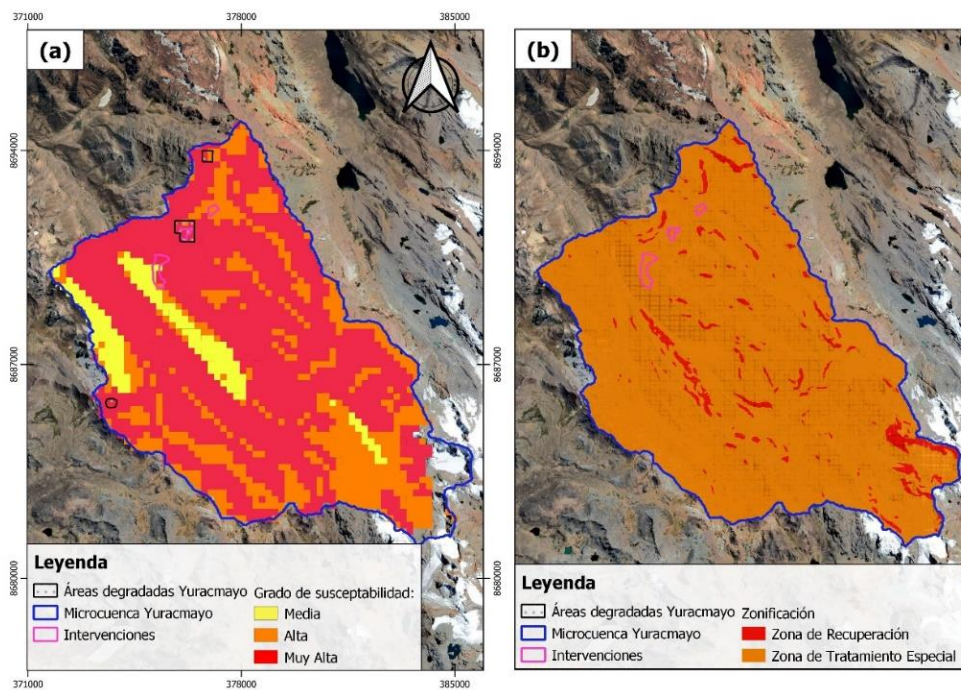


Fig. 4.7. a) Mapa de susceptibilidad a movimientos de masas y áreas degradadas b) Mapa de zonificación de zonas de tratamiento especial.

Respecto a la geología del área gran parte de la microcuenca Yuracmayo está sobre la Formación Carlos Francisco, que pertenece al Terciario Inferior y Medio, cubierto por

depósitos fluvioglaciario, producto de la fuerte erosión ocasionado por los glaciares que se inician por la zona noreste de la represa (Ver **Fig. 4.8.**). Estos depósitos son originados por acción fluvial y por arrastre causado por el agua del deshielo de los glaciares, estas zonas presentan alta permeabilidad por lo que transmiten y almacenan grandes cantidades de agua subterránea. También está presente la formación Jumasha y Casapalca, rocas pertenecientes al Cretáceo superior que afloran en las partes altas de la Cordillera Central. Por último, también hay plutones intrusivos, por la presencia de afloramientos de Dioritas que están emplazados en la zona norte de la represa.

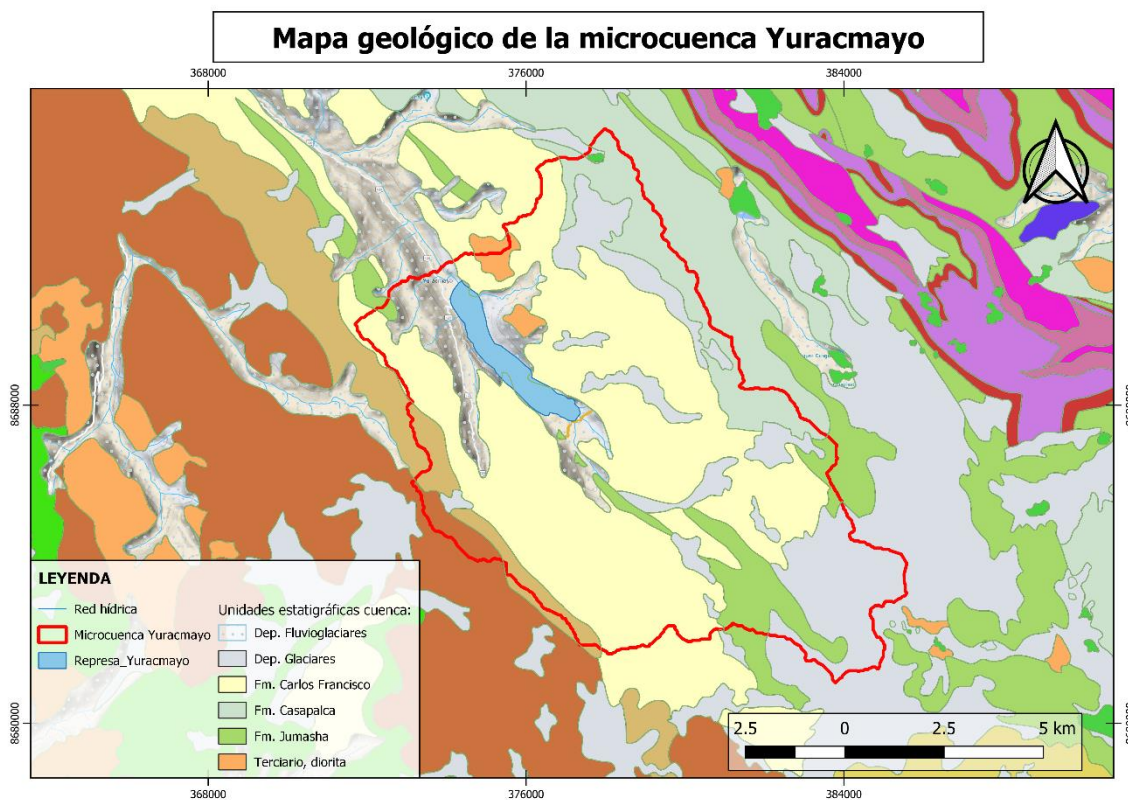


Fig. 4.8. Componentes Geológicos de la microcuenca Yuracmayo.

Respecto a la hidrogeología, la parte alta de la microcuenca se encuentra sobre un Acuífero Fisurado Sedimentario (Ver **Fig. 4.9**), estos son un tipo de acuíferos moderadamente productivos (permeabilidad media) que cuentan con fisuras y rocas semi permeables que favorecen la capacidad de drenaje, pero con lenta transmisión de apreciables

cantidades de agua. Por otro lado, gran parte de la microcuenca está sobre un Acuitardo Volcánico Sedimentario, dado su naturaleza este acuífero se encuentra en zonas fracturadas o meteorizadas y poseen una permeabilidad baja. Por último, en menor medida se tiene al Acuitardo Volcánico que en comparación con el Acuitardo Volcánico Sedimentario tiene un almacenamiento nulo.

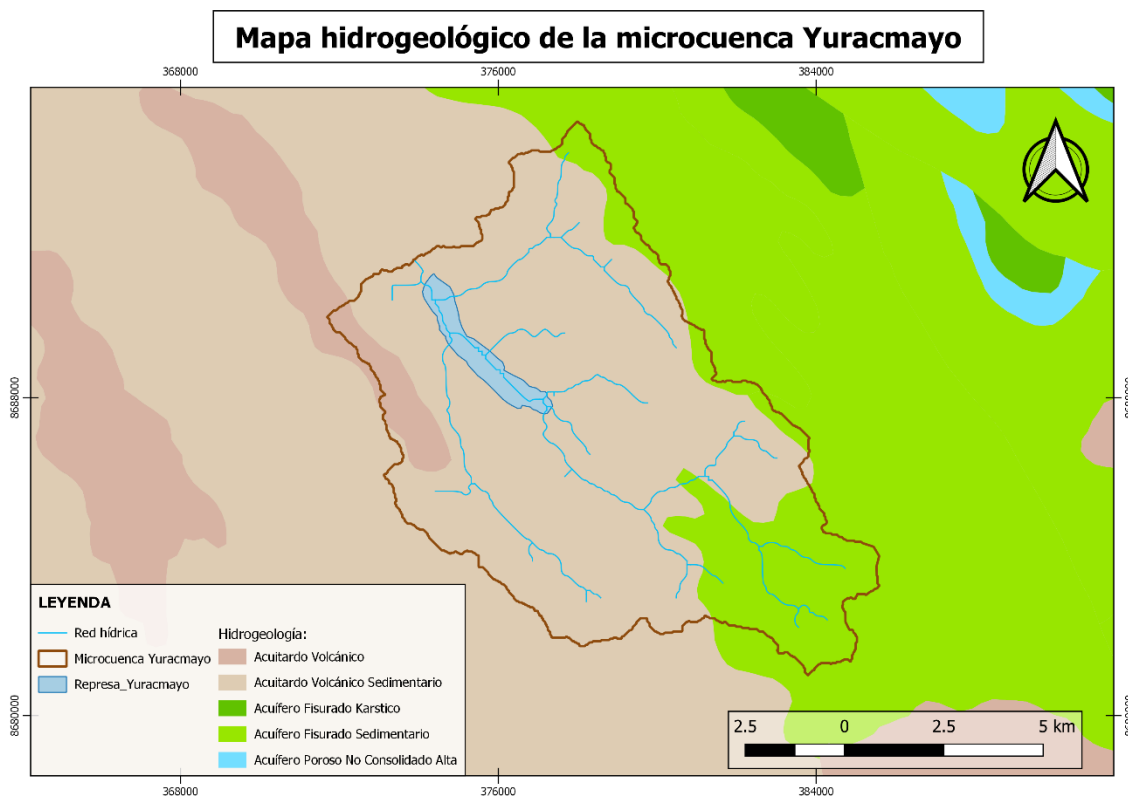


Fig. 4.9. Componentes Hidrogeológicos de la microcuenca Yuracmayo.

Fuente: Elaboración propia con información del Mapa Hidrogeológico del Perú 1:1 000 000 - INGEMET

Las formaciones Jumasha y Casapalca también están presentes en la cuenca vecina del Mantaro, los acuíferos pertenecientes a estas formaciones se recargan principalmente de la percolación superficial de acuitardos y de las precipitaciones, así como del deshielo de zonas nevadas, en su mayoría en la zonas fluvioglaciares [72]. Según el Estudio Hidrogeológico del Ámbito de la UEA Ticlio (2007) mencionado en [72], indica que la mayor parte de las aguas subterráneas parecen ser de circulación subsuperficial y corta, las

cuales descargan en forma de manantiales de bajo caudal o bofedales. Los acuitardos en la cuenca del Mantaro están conformados por rocas ígneas de baja permeabilidad que descargan agua en forma de flujo diseminado formando bofedales de ladera. De la misma manera podría darse en Yuracmayo, específicamente en la quebrada Aycagranga donde los intrusivos de diorita que se encuentran clasificados como acuitardos por su baja transmisividad descargan agua en bofedales de la quebrada. Por otro lado, rocas con estratos impermeables como la formación Casapalca favorecen la descarga hacia la cuenca del Río Mantaro. Para el caso de Yuracmayo, la formación Casapalca también podría descargar sus aguas en la quebrada del Río Blanco o en la represa. Sin embargo, se necesitaría de pozos de monitoreo para afirmar la existencia de la recarga subterránea de la represa por los acuíferos.

4.2. Monitoreo de bofedales a escala cuenca mediante SIG

En este apartado se muestra los resultados del producto SMAP para el monitoreo de humedad del suelo. También el uso de imágenes satelitales de Landsat 5 y 8 para el monitoreo del cambio de cobertura de bofedales en Yuracmayo.

El producto SMAP muestra una respuesta confiable y esperada de capturar las dinámicas estacionales de la humedad del suelo relativo a la precipitación (ver **Fig. 4.10**). A nivel superficial tiene un valor medio de 0.17, que está en un rango (0.15 – 0.20) de un suelo con agua, lo suficiente para tener una actividad de campo vigorosa. A nivel subsuperficial la humedad del suelo es de 0.65 que se encuentra en un rango intermedio (0.25 – 1.00) lo que indica que el almacenamiento de la humedad del suelo subsuperficial es corto, pero aún puede soportar una especie bien establecida. Asimismo, vemos una gran correspondencia a nivel estacional y anual con la precipitación, esto podría darse dado que la humedad presente en el suelo se recargue directamente de los eventos de precipitación. En la época de estiaje el almacenamiento de humedad del suelo subsuperficial y superficial es mínimo, los bofedales pueden estresarse severamente y reducir los rendimientos en su almacenamiento, especialmente si ocurre cuando la capa superior tiene poca o ninguna humedad significativa del suelo y la cobertura se encuentra en una etapa crítica de crecimiento.

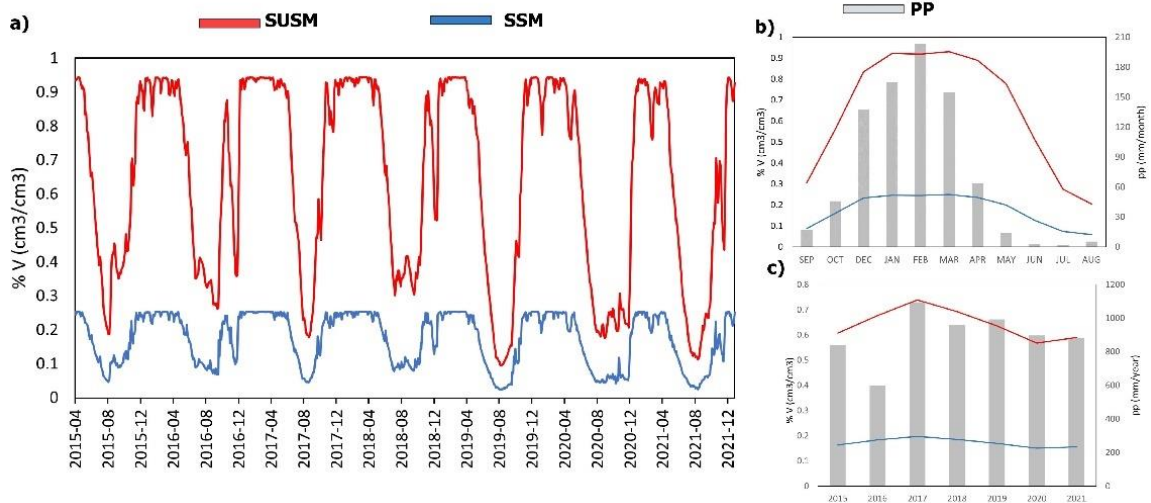


Fig. 4.10. Series de tiempo de humedad del suelo subsuperficial (susm) y humedad del suelo superficial (ssm): a) Serie interdiaria b) Serie estacional c) Serie interanual.

Para delimitar el área de bofedales se tuvo como indicador aquellas áreas que tienen un NDVI ≥ 0.6 , para toda la serie a estudiar (1990 – 2021). La principal restricción es tener un porcentaje de nubes menor al 20% (ver **Anexo 6**). La **Fig. 4.11** muestra la serie interanual de cambio de superficie de los bofedales para Yuracmayo y la subcuenca Aycagrange, en ambas cuencas se da la misma tendencia en el aumento y disminución del área de bofedales. El periodo con menor cobertura de extensión de bofedales fue en 1992, año que coincide con la menor precipitación (377 mm/año), por otro lado, la mayor cobertura de bofedales se dio en el año 2015, donde se da un valor máximo de la precipitación acumulada en los meses de junio, julio y agosto (JJA) con el valor de 18.70 mm/mes. El registro analizado presenta una tendencia significativa creciente ($Z=2.32$) con un incremento anual a razón de $\sim +5$ ha/año; sin embargo, desde el año 2015 presenta una tendencia decreciente, donde se perdió más del 50% de extensión de bofedales (2015 al 2021) a una razón de -23 ha/año. La disminución de la extensión de bofedales podría estar relacionado con la fuerte disminución de la precipitación en el mismo periodo, eso se asemejaría a las predicciones en cuencas altoandinas del sur del Perú (Arequipa y Moquegua), donde escenarios simulados indican una reducción de hasta el 100 % en la densidad de los bofedales, siendo la disminución de las precipitaciones el principal factor [73]. Se determinó estadísticamente que existe una dependencia entre la extensión de los bofedales con la lluvia acumulada durante los meses

de junio a agosto del mismo periodo (2015 – 2021), indicado por el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.69$). La existencia de los bofedales perennes en la época seca es un indicador de su dependencia de distintas fuentes de agua como las del flujo base. Resultados parecidos se encontraron en otros lugares del Perú como la cabecera de cuenca del río santa, [13] y en los Andes del Sur del Perú [12]; donde se hallaron relaciones de dependencia aceptables ($R^2 \sim 0.70$) entre el % de cobertura de los bofedales y la precipitación acumulada.

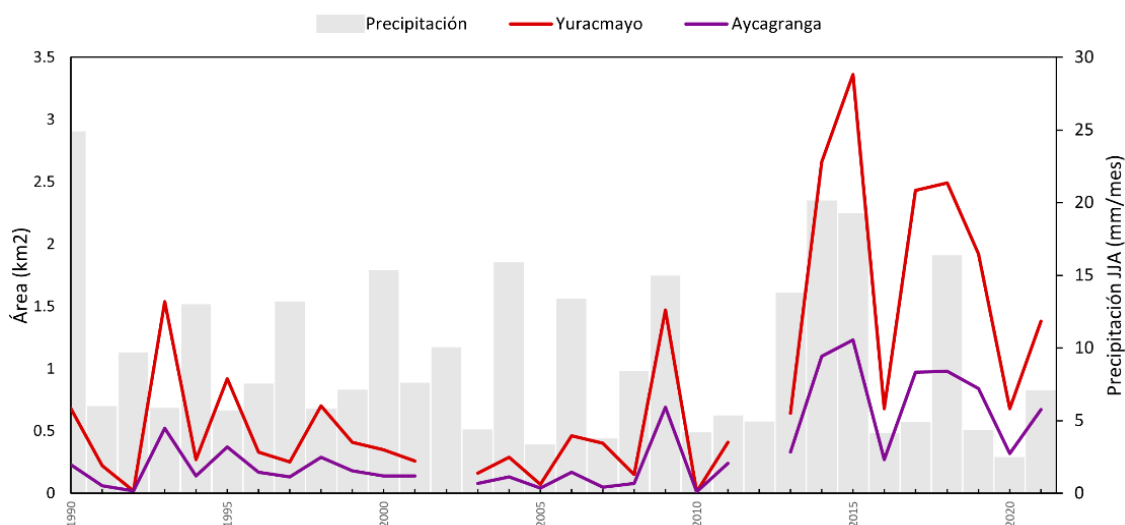


Fig. 4.11. Series de tiempo de extensión de bofedales en Yuracmayo y Aycagranga conjunto a la precipitación acumulada.

4.3. Monitoreo de variables ambientales en Aycagranga

En este apartado se desarrolla el monitoreo a escala micro (en la quebrada Aycagranga) y a escala puntual (bofedales) del sistema de monitoreo propuesto. A escala micro se monitoreó el caudal a través del producto GloFAS, y a escala puntual se toma muestras in-situ en los bofedales.

En primer lugar, se comparó los productos de los caudales naturalizados (serie observada de categoría empírica) y GloFAS (serie simulada). El producto GloFAS presenta la misma variabilidad en eventos máximos y mínimos que los datos observados, pero sobreestima los caudales en la época seca (Ver **Fig. 4.12-a**) hasta en un 100%. Aprovechando la correspondencia estacional de ambas series de tiempo, se aplicó una corrección a los datos GloFAS en función de los datos observados descrito en la metodología. Las limitaciones del

producto GloFAS en la representación del caudal ha sido registrada en otros estudios como en [16], donde se analizó distintas cuencas extensas del Perú, obteniendo grandes diferencias cuantitativas entre los caudales registrados y simulados. Sin embargo, estos productos de reanálisis de tipo grillado como GloFAS requieren ser corregidos con información in-situ y de esta forma poder regionalizar en áreas circundantes, logrando estimar adecuadamente los caudales en zonas sin medición, tal como se muestra en la **Fig. 4.12-b**.

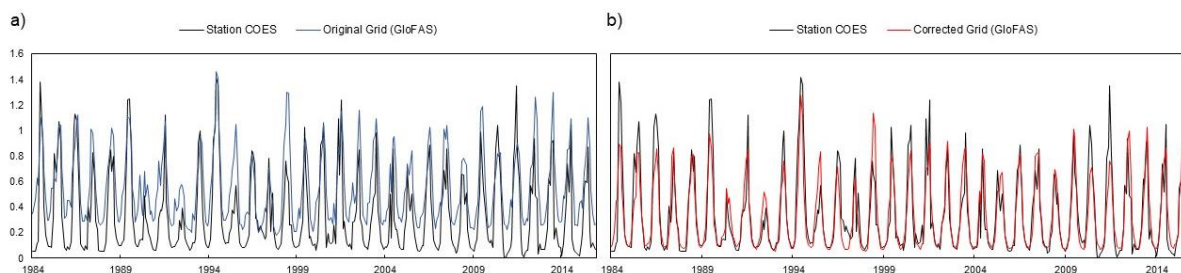


Fig. 4.12. (a) Serie mensual de balance hidrológico y (b) serie interanual de balance hidrológico.

De estos resultados, se obtuvieron un índice de NSE igual a 0.78, PBIAS igual a 0.26%, RMSE a 0.15 y RSR 0.22. Estos resultados son alentadores con criterios de aceptabilidad muy buenos, puesto que la información in-situ de los caudales naturalizados podría también ser utilizada en la corrección del resto de grillas GloFAS en la zona de estudio, logrando una mejor cobertura de caudales estimados en zonas sin medición.

Con respecto a las variables biofísicas la **Fig. 4.13** muestra los puntos monitoreados en los bofedales de la quebrada Aycagranga: Aycagranga 1 (Ayca 1) y Aycagranga 2 (Ayca 2).

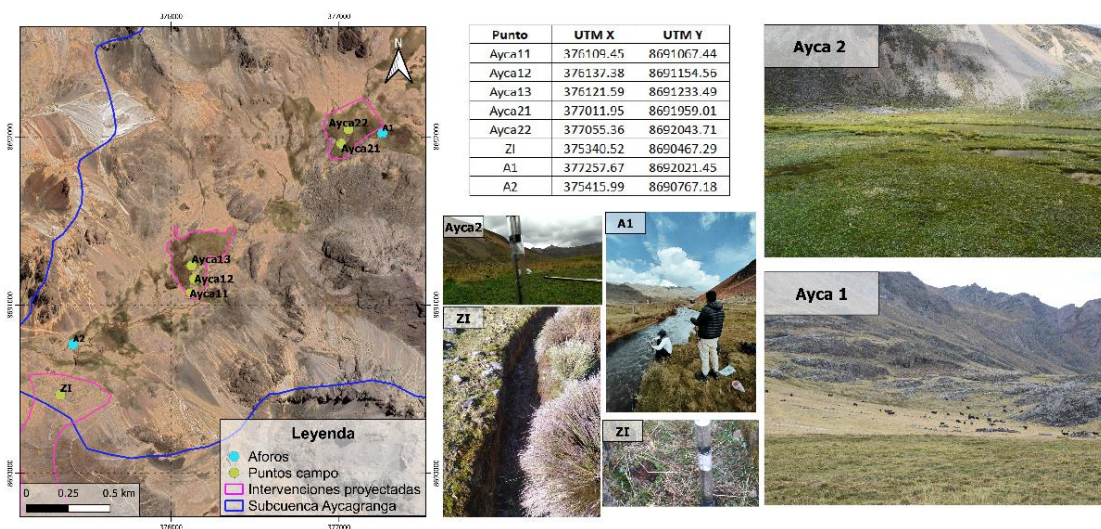


Fig. 4.13. Mapa de puntos de monitoreo en la investigación

Los valores medidos en campo se detallan en la **Tabla 4.13**. La capacidad de campo y del punto marchitez permanente se encuentran en los rangos esperados para el tipo de textura de suelo que pertenece, arena franca y franco arenoso. Para la CC en todos los puntos se presentó un valor de 8.6% a excepción del punto Ayca13, que tiene un valor de 11.4%, a pesar de ello está entre el rango de valores para un suelo arenoso (5% - 15%). Para el caso de PM todos los puntos tienen un valor de 3.78% a excepción de Ayca13, que tiene un valor de 5.52%, igualmente estos valores se encuentran en el rango para un suelo arenoso (3% - 8%). Ambos parámetros son considerados los límites que definen la necesidad de agua de la vegetación para su óptimo desarrollo, y según su clase estructural se esperaría que tenga un valor medio o alto para la infiltración del agua.

El contenido de Materia Orgánica para todos los casos es superior al 50%, un valor aceptable para el contenido de Materia Orgánica en turberas (40 – 60%), rango superior al 30% mínimo que debería tener un suelo de turba. El único valor bajo es Ayca12 (14.81%), las propiedades del suelo como las propiedades hidrológicas pueden influir en las tasas de deposición y descomposición de la turba, y por ende, en el almacenamiento de carbono y contenido de materia orgánica [74]. El valor mínimo puede ser causado por la presencia de sobrepastoreo identificada en la zona que ha degradado la cobertura del bofedal y no ha

permitido una correcta descomposición de la turba, in situ se identificó el pastoreo de animales no nativos como vacunos, equinos y caprinos.

Dado que es más complicado controlar la forma en cómo se recargan los bofedales, se debe asegurar que la capacidad de almacenamiento de agua en bofedales sea máxima, para no perjudicar el servicio de regulación hídrica que proveen.

Indicador	Aycagangra 1			Aycagranza 2	
	1	2	3	1	2
CC (%)	8.6	8.6	11.4	8.6	8.6
MO (%)	58.03	14.81	51.42	55.23	53.1
PM (%)	3.78	3.78	5.52	3.78	3.78
TI (cm/hr)	9.85 Moderado	22.32 Moderadamente rápido	10.06 Moderado	2.36 Moderadamente lento	6.54 Moderado
Kv (cm/hr)	2.83	5.01	4.41	0.68	2.22
Textura de suelo	A.Fr.	Fr.A.	A.Fr.	A.Fr.	A.Fr.

A.Fr: Arena Franca, Fr.A: Franco Arenoso

Tabla 4.3. Parámetros de la situación actual de los bofedales en Aycagranza.

Para la mayoría de los puntos, la tasa promedio de infiltración vertical tiene valores moderados y moderadamente lentos según la clasificación de USDA (199:56). Tanto para TI y Kv se tienen los valores más bajos en Aycagranza 2, y en el punto Ayca12 los valores más altos. Ver **Tabla 4.3**, y las curvas de infiltración en el **Anexo 7**.

Valores más cercanos a nuestros resultados se encuentran en turberas de los Andes centrales del Perú, donde se halló valores de conductividad hidráulica vertical de 0.23 a 3.33 cm/hr [75]. En Ayca12 y Ayca13 presentan valores máximos, esto puede responder a la presencia de ganado en esta área, donde dicha actividad ocasiona zonas degradadas y secas que favorecen el ingreso del agua a los bofedales. Por otro lado, Aycagranza 2 es un bofedal remoto y lejano de las actividades antrópicas de la subcuenca que presenta una infiltración promedia muy baja. Valores menores para TI también se puede dar por la morfología de la cobertura del bofedal, una cobertura vegetal que forman matas gruesas, con hojas punzocortantes pegadas al piso, y con eventos de precipitación continuo, reducen la infiltración en la tierra. El sobrepastoreo que puede ocurrir en la subcuenca debilita la estructura del suelo y se obstruyen los poros por la carga animal. En [76] menciona que el pastoreo tiene un efecto pronunciado sobre la densidad aparente del suelo, la porosidad, la

infiltración, almacenamiento de agua, las características de transporte de agua y la escorrentía.

4.4. Evaluación de indicadores del sistema de monitoreo

En este último apartado de la sección de resultados se desarrolla los resultados de los indicadores del sistema de monitoreo propuesto.

El primer indicador meteorológico es la variación del balance hídrico (BH). La **Fig. 4.14** muestra la serie mensual (a) e interanual (b) en Yuracmayo. En la serie mensual se muestra que los picos con mayor magnitud son los positivos como los ocurridos en los años 1982-83 y 1987-88, correspondientes a eventos del El Fenómeno del Niño muy fuertes. Asimismo, se representa la estacionalidad donde repetitivamente se llega a un déficit hídrico de -100 mm/mes en los meses más secos de la cuenca.

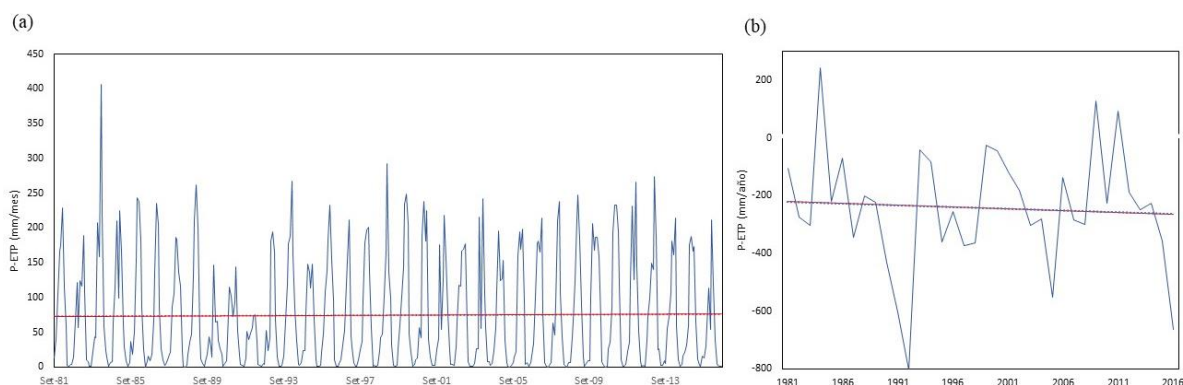


Fig. 4.14. (a) Serie mensual de balance hidrológico (BH) y (b) serie interanual de balance hidrológico.

La serie mensual presenta una tendencia no significativa creciente ($Z=0.50$), con valores máximos y mínimos bien marcados y secuenciales. Por otro lado, a nivel anual (**Fig. 4.12-b**) se aprecia una tendencia no significativa decreciente a razón de -1.25 mm/año, donde se llega a alcanzar un gran déficit de hasta -800 mm/año, esto principalmente se debe porque en 1991 fue el año con menor precipitación registrada. Existe una tendencia significativa decreciente desde el año 2010 a escala anual ($Z=-2,10$) a una razón de -80 mm/año, estas grandes cifras son preocupantes ya que implica un escenario desfavorable para todo tipo de cobertura vegetal presente en la microcuenca. La relación estadística hallada anteriormente

indica que existe una correlación aceptable entre la extensión de los bofedales y la precipitación, por ende, no solo se minimiza una fuente de recarga para los bofedales, sino que cada vez ellos demandarán más el recurso hídrico.

Con respecto al índice de estacionalidad (SINDX) es un índice adimensional que se evalúa a lo largo de todo el año hidrológico y se presenta en la **Fig. 4.15** para la microcuenca Yuracmayo.

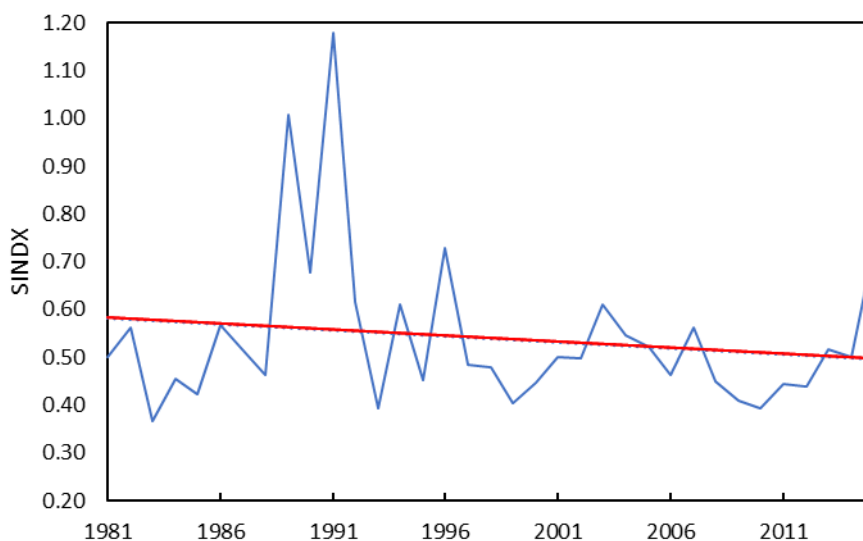


Fig. 4.15. Serie interanual del SINDX.

La serie interanual presenta una tendencia no significativa decreciente ($Z = -0.74$) a lo largo de los años y cuenta con un valor medio de 0.54. Este valor se encuentra en un valor intermedio (~ 0.50) representando lluvias con poca variabilidad que solo ocurren en algunos meses del año. La serie cuenta con grandes picos en los años de 1983 y 1991, años que fueron el año más húmedo y seco, respectivamente. Esto es de esperarse ya que, en los meses más húmedos de los años más secos, los niveles de precipitación no alcanzan valores tan altos o extremos respecto a los niveles de precipitación de meses del resto de año. La serie presenta una disminución en la estacionalidad a razón de -0.03 por año, la continua disminución implicaría que los meses de avenida con altas precipitaciones estarían disminuyendo, por ende, aportando menos a la cuenca. Valores similares a nuestros resultados se encontraron en cuencas de sierra central del Perú, en las cuencas Anya y Mchique en Junín (subcuencas

del Mantaro) donde predomina un clima templado frío y precipitaciones estacionales en los meses de noviembre a abril, allí se registraron valores de ~ 0.50 para el SINDX. Por otro lado, en microcuencas de sur del Perú y Bolivia también presentaron un régimen de estacionalidad alto ($SINDX > 0.30$), esto produjo volúmenes de caudal variables y estacionales que llegaron a ser casi nulos durante los meses más secos [77].

Por otro lado, los indicadores relacionados con características de caudales son: RR, IRH y R2FDC. La relación entre el volumen de caudal y el volumen de la precipitación es representando por el indicador RR, como se ve en la **Fig. 4.16** a nivel mensual e interanual.

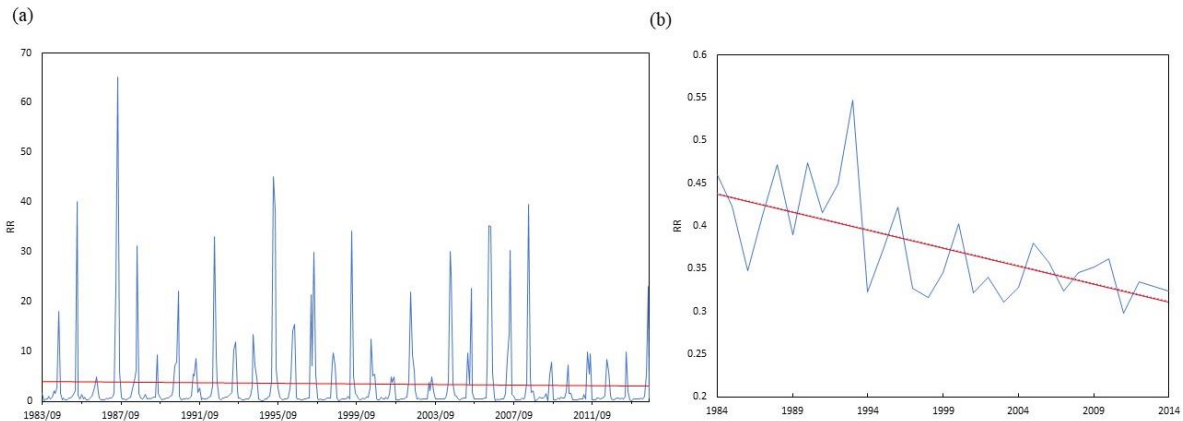


Fig. 4.16. (a) Serie mensual de RR y (b) serie interanual de RR. Ambas series con datos del caudal naturalizado

A nivel mensual se observa un patrón repetitivo de valores máximos, donde el valor máximo alcanzado de $RR_{mensual}$ es 65.12 en julio de 1987, mes donde se registró la menor precipitación mensual de la cuenca. Esta variación periódica representa los periodos secos de la cuenca, donde el volumen descargado en forma de caudal es mucho mayor que el volumen ingresado por las precipitaciones. En los meses de abril a agosto el volumen mensual de caudal generado es mayor al volumen de las precipitaciones, caso contrario pasa en los meses de setiembre a marzo como se representa en la **Fig. 4.17**. La misma figura evidencia la regulación hídrica de la cuenca con la descarga continua en los meses más secos, también que el caudal generado responde a la estacionalidad de las precipitaciones, y que otros factores como puede ser el almacenamiento del agua en los bofedales contribuyan a que en los meses de déficit hídrico no se tenga un caudal menor.

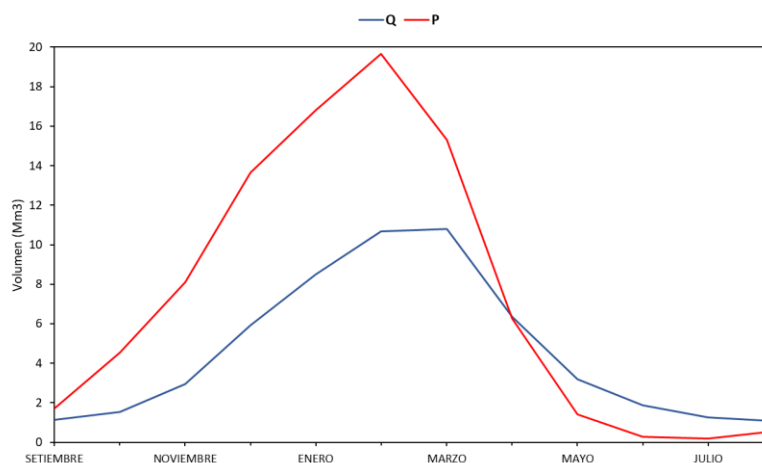


Fig. 4.17. Serie estacional (1984 – 2014) del volumen de caudal promedio y el volumen de lluvia mensual promedio

Respecto a la serie RR_{anual} presenta una tendencia significativa decreciente ($Z=-2.31$) y un valor promedio de $RR_{anual} = 0.62$. La serie interanual refleja una condición desfavorable para la microcuenca, que indicaría que se está perdiendo la aparente eficiencia en su rendimiento hídrico. En microcuencas de las punas de los Andes investigaciones [77] indican que valores bajos en este indicador se debe a una mayor estacionalidad de la precipitación. Para el caso de Yuracmayo los registros históricos analizados demuestran que las precipitaciones han aumentado y que la estacionalidad ha disminuido, por lo que la disminución del RR se pueda deber a otros factores, tales como otras rutas preferenciales por los caudales como agua subterránea y agua subsuperficial, posiblemente incrementándose por infiltraciones en el suelo [78]. Una hipótesis de ello es que la formación Casapalca, entre otras unidades de roca no productoras de agua que conforman la microcuenca, actúen como estratos impermeables para la recarga de agua en la represa, y sus aguas se descarguen en manantiales o aguas debajo de la quebrada del río Blanco.

Respecto Índice de Regulación Hídrica (IRH) es un indicador adimensional que evalúa los volúmenes de caudales mensuales, la serie interanual se presenta en la **Fig. 4.18**.

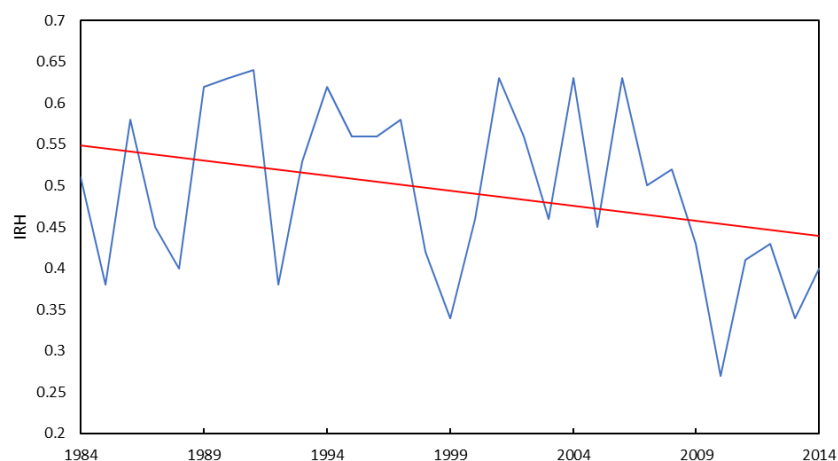


Fig. 4.18. Serie interanual de IRH

La serie presenta una tendencia no significativa decreciente ($Z=-1.66$) y un valor promedio de IRH de 0.50, encontrándose en un rango de baja regulación de la humedad y retención. Esta capacidad se ha mantenido muy variante de 0.28 a 0.64, pero ha alcanzado su mínimo valor en el último periodo (2009 – 2014). La disminución en la capacidad de retener los caudales, y la disminución en la capacidad de proveer a través de índice RR_{anual} son características de la cuenca que demuestran la necesidad de tener infraestructura de regulación. Cabe mencionar que en general un valor bajo en el IRH en Yuracmayo se deba a sus características fisiográficas como ser una cuenca de montaña con altas pendientes y la poca presencia de coberturas vegetal, considerando que una quinta parte de la cuenca es suelo desnudo. Valores bajos del IRH se encontraron en microcuencas de la puna central en Huaraz (IRH de 0.38 a 0.43) y en Huamantanga (0.02 y 0.06), estos valores mínimos se deben a una gran diferencia entre los caudales altos y bajo, y el cambio de uso de suelo [77]

El índice de pendiente del tercio medio de la curva de duración de caudales en escala logarítmica R2FDC es un índice adimensional que indica la capacidad de regulación hidrológica en base a la pendiente en la FDC (curva de duración de duración del caudal anual). En la **Fig. 4.19.** se muestra la serie interanual de este indicador.

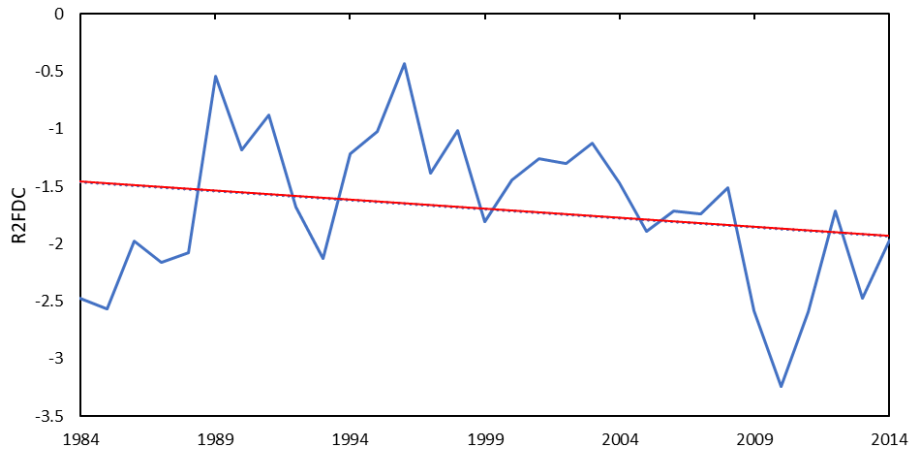


Fig. 4.19 Serie interanual de R2FDC

La serie interanual de R2FDC presenta una tendencia no significativa decreciente ($Z=1.33$) y un valor promedio de -1.70 , este valor caracteriza a la microcuenca con una moderada capacidad de regulación hidrológica, donde el agua se almacena por poco tiempo provocando caudales máximos. Como referencia se ha encontrado valores de R2FDC alrededor de -2 para ecosistemas de Puna húmeda, y valores mayores en cuencas más empinadas. Tal es el caso de estas cuencas que están caracterizadas por mayores influencias de la lluvia y el dominio del flujo de retorno en sus hidrogramas; indicando que el agua no permanece almacenada por mucho tiempo [79].

En resumen, los indicadores nos demuestran condiciones desfavorables respecto al servicio de regulación hídrica de la cuenca. Todos los indicadores presentan tendencias decrecientes, y específicamente el indicador RR_{anual} con una tendencia significativa que evidencia la disminución de la capacidad productora de la cuenca respecto a la recarga por las precipitaciones. La disminución conjunta del BH y el SINDEX, indicaría que habrá una mayor dispersión en las precipitaciones a lo largo del año hidrológico y que a su vez aumentarían la evapotranspiración de referencia a nivel anual. La disminución del RR_{anual} e IRH, indicaría que la microcuenca está perdiendo su capacidad de generar caudales y también de retenerlos, esto ocasionaría una consecuencia directa al almacenamiento de la

represa Yuracmayo. Los indicadores de IRH y R2FDC evalúan la curva de duración de duración de los caudales, y en conjunto indican que la microcuenca presenta una baja capacidad de regulación hidrológica y de la humedad, al presentar una alta rapidez de respuesta del caudal y a eventos de precipitación, lo que afectaría a un almacenamiento de agua en la cuenca y en el volumen de caudales entregados en los meses más secos (disminución del RR).

CONCLUSIONES

1. En la presente investigación se logró desarrollar un sistema de monitoreo ambiental basado en la EO que permitió conocer las características hidrológicas en una cuenca con escasos registros. A escala macro (cuenca Yuracmayo) y micro (Subcuenca Aycgranga) se hallaron indicadores de condiciones desfavorables climáticas y la disminución de la capacidad de regulación hídrica de la cuenca. A escala puntual se halló que la extensión de los bofedales se está reduciendo y están en un estado de calidad de regular a bueno.
2. En la microcuenca Yuracmayo se encontraron condiciones climáticas desfavorables en las tres últimas décadas: Se presentan tendencias crecientes para la temperatura (+ 0.03 °C/año) y la evapotranspiración potencial (+ 1.18 mm/año), producto del calentamiento continuo experimentado en zonas altoandinas tropicales; presentan tendencias crecientes para la precipitación (+ 3.76 mm/año), debido a la variabilidad estacional; y una tendencia decreciente significativa para los caudales de ingreso a la represa (- 0.01 m³.s⁻¹/año), dado por la disminución de la capacidad de regulación hídrica de la cuenca.
3. Se analizó la variación espacio temporal de las áreas del bofedal por medio del índice NDVI (1990 – 2021). La cobertura de bofedales en Yuracmayo presenta una tendencia no significativa creciente, pero en los últimos 5 años ha disminuido más del 50% su cobertura.
4. Se exploró el producto global GloFAS de reanálisis hidrológico como alternativa de sensoramiento remoto para el registro de caudales. Con este análisis se obtuvieron resultados alentadores a escala mensual (1984 a 2021) en la microcuenca Yuracmayo, previo a una corrección por reducción de escala del tipo multiplicativo, logrando un NSE de 0.78.

5. Los bofedales estudiados presentaron tasas de infiltración desde moderadamente lento a moderadamente rápido. Cuentan con valores de K_v de 0.68 a 5.01 y con contenido de materia orgánica superior al 50% que dan cuenta de un estado de regular a bueno del estado ecosistémico del bofedal.
6. Los indicadores BH y SINDX demostraron una disminución en la estacionalidad de la cuenca, es decir, una mayor variabilidad y disminución de las precipitaciones mensuales. Por otro lado, los indicadores de RR, IRH y R2FDC mostraron la disminución de la capacidad productora de agua de la cuenca, la capacidad de regulación hidrológica, y la capacidad de retención frente a eventos de precipitación en la cuenca, respectivamente.
7. Se encontraron tendencias decrecientes en el rendimiento hídrico de la cuenca ($RR \approx 0.62$), al igual que una baja capacidad de retención y regulación del agua ($IRH \approx 0.50$). Estos escenarios son críticos para el almacenamiento hídrico en la represa; además, son desfavorecidos por la disminución de las precipitaciones y la reducción de extensión de bofedales ($> 50\%$) en el periodo 2015 – 2021.
8. La presente investigación cumplió con el objetivo de ofrecer una primera documentación en la caracterización de la microcuenca Yuracmayo de gran importancia para la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Rímac y la ciudad de Lima, contribuyendo con el valor agregado además de proponer indicadores para la continuidad de su uso en sistemas de monitoreo, y la importancia de reforzar esfuerzos de monitoreo. Los resultados presentados y las fases a continuar permitirán a los tomadores de decisiones priorizar sus acciones de intervención en la IN, y entender la necesidad de elaborar un sistema de monitoreo completo que refleje los resultados de una intervención

RECOMENDACIONES

1. Es importante que futuras iniciativas de implementación de intervenciones en la IN en Yuracmayo consideren la inclusión de la población aledaña como parte de la solución en el cuidado y conservación de los ecosistemas. Debido a lo identificado en la investigación, la presencia de ganado o sobrepastoreo podría estar afectando la capacidad de infiltración natural de los suelos de bofedal.
2. Se sugiere continuar con el monitoreo de los indicadores propuestos en la presente investigación en la etapa de ejecución y posterior a la implementación de una intervención, para lograr tener un sistema de monitoreo completo que aporte en la evaluación de la efectividad de una intervención.
3. Para futuras investigaciones se recomienda estudiar las otras dos quebradas aportante a la represa Yuracmayo (Yanavisca y Río Blanco) para tener una mejor entendimiento del sistema Yuracmayo y su aporte a la represa. Asimismo, se sugiere evaluar la influencia de los glaciares y su retroceso en la continua recarga de la represa.
4. Para asegurar la sostenibilidad de proyectos de inversión en Yuracmayo es necesario considerar monitoreos con enfoques participativos y basados en la EO. Si bien, se obtuvieron resultados alentadores del producto GloFAS a un paso de tiempo mensual, cuya corrección se puede realizar utilizando una información in situ como una estación hidrométrica cercana. Otras actividades de esta investigación incluyen la instalación de sensores para registrar los caudales diarios durante un año hidrológico en la entrada de la presa, para poder compararlo con el producto GloFAS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINAM, “Guía de evaluación del estado del Ecosistema de bofedal,” Lima, 2019. [Online]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-evaluacion-estado-ecosistema-bofedal>
- [2] P. Kumar *et al.*, “An overview of monitoring methods for assessing the performance of nature-based solutions against natural hazards,” *Earth Sci Rev*, vol. 217, no. March, 2021, doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103603.
- [3] N. Chrysoulakis, G. Somarakis, S. Stagakis, Z. Mitraka, M.-S. Wong, and H.-C. Ho, “Monitoring and Evaluating Nature-Based Solutions Implementation in Urban Areas by Means of Earth Observation,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1503, Apr. 2021, doi: 10.3390/rs13081503.
- [4] K. E. Smokorowski and R. G. Randall, “Cautions on using the Before-After-Control-Impact design in environmental effects monitoring programs,” *FACETS*, vol. 2, no. 1, pp. 212–232, May 2017, doi: 10.1139/facets-2016-0058.
- [5] IUCN, “IUCN Global Standard for Nature-based Solutions,” Gland, Switzerland, 2020. doi: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.en>.
- [6] European Commission, “Nature-based solutions,” 2019. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en
- [7] R. Hakimdavar *et al.*, “Monitoring water-related ecosystems with earth observation data in support of Sustainable Development Goal (SDG) 6 reporting,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 12, no. 10, May 2020, doi: 10.3390/rs12101634.
- [8] K. Jones, Y. Lanthier, P. van der Voet, E. van Valkengoed, D. Taylor, and D. Fernández-Prieto, “Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: The GlobWetland project,” *J Environ Manage*, vol. 90, no. 7, pp. 2154–2169, May 2009, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2007.07.037.
- [9] F. Zhao, S. Feng, F. Xie, S. Zhu, and S. Zhang, “Extraction of long time series wetland information based on Google Earth Engine and random forest algorithm for a plateau lake basin – A case study of Dianchi Lake, Yunnan Province, China,” *Ecol Indic*, vol. 146, p. 109813, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.109813.

- [10] Y. Liu *et al.*, “Vietnam wetland cover map: using hydro-periods Sentinel-2 images and Google Earth Engine to explore the mapping method of tropical wetland,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 115, p. 103122, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.JAG.2022.103122.
- [11] S. Gxokwe, T. Dube, and D. Mazvimavi, “Leveraging Google Earth Engine platform to characterize and map small seasonal wetlands in the semi-arid environments of South Africa,” *Science of The Total Environment*, vol. 803, p. 150139, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.150139.
- [12] M. Otto, D. Scherer, and J. Richters, “Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data,” *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 15, no. 5, pp. 1713–1727, May 2011, doi: 10.5194/hess-15-1713-2011.
- [13] E. Garcia and M. Otto, “Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del río Santa, Ancash, Perú,” *Ecología Aplicada*, vol. 14, no. 2, p. 2015.
- [14] A. Pauca-Tanco *et al.*, “View of Spatio temporal and climatic analysis of the high Andean wetland of Chalhuanca (Peru) during the period 1986-2016,” *Revista de Teledetección*, vol. 55, pp. 105–118, 2020, doi: <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13325>.
- [15] P. Rau, F. Castillon, K. Visitacion, M. Yeckle, and M. Cordova, “Assessing extreme monthly runoff over an arid basin through reanalysis datasets,” 2023.
- [16] K. Bischiniotis, B. van den Hurk, E. Zsoter, E. Coughlan de Perez, M. Grillakis, and J. C. J. H. Aerts, “Evaluation of a global ensemble flood prediction system in Peru,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 64, no. 10, pp. 1171–1189, Jul. 2019, doi: 10.1080/02626667.2019.1617868.
- [17] L. Alfieri *et al.*, “GloFAS – global ensemble streamflow forecasting and flood early warning,” *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 17, no. 3, pp. 1161–1175, Mar. 2013, doi: 10.5194/hess-17-1161-2013.
- [18] L. Boelee, “Evaluation of global flood forecasts in ungauged catchments.”
- [19] L. Boelee, E. Zsoter, D. Lumbroso, P. Samuels, J. Bazo, and Cloke Hannah, “Analysis of the uncertainty in flood predictions of GloFAS forecasts for Piura in the Pacific region of Peru,” Vienna, Apr. 2017.

- [20] N. M. Velpuri, G. B. Senay, and J. T. Morisette, "Evaluating New SMAP Soil Moisture for Drought Monitoring in the Rangelands of the US High Plains," *Rangelands*, vol. 38, no. 4, pp. 183–190, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.rala.2016.06.002.
- [21] F. Mohseni, S. M. Mirmazloumi, M. Mokhtarzade, S. Jamali, and S. Homayouni, "Global Evaluation of SMAP/Sentinel-1 Soil Moisture Products," *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/rs14184624.
- [22] J. Fan, Q. Han, S. Tan, and J. Li, "Evaluation of Six Satellite-Based Soil Moisture Products Based on in situ Measurements in Hunan Province, Central China," *Front Environ Sci*, vol. 10, Feb. 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.829046.
- [23] A. Belousova, I. K. Gavich, A. B. Lisenkov, and E. V. Popov, *Ecological Hydrogeology: University Handbook*. 2006.
- [24] J. Arts and S. Nooteboom, "Environmental impact assessment monitoring and auditing," in *Handbook of Environmental Impact Assessment*, 1999, pp. 229–251.
- [25] J. F. Artiolat, I. L. Pepperm, and M. L. Brusseau, "Monitoring and characterization of the Environment," in *Environmental Monitoring and Characterization*, 2004, pp. 1–9. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012064477-3/50003-5>.
- [26] J. F. Artiola and A. W. Warrick, "Sampling and data quality objectives for Environmental Monitoring," *Environmental Monitoring and Characterization*, pp. 11–27, Jan. 2004, doi: 10.1016/B978-012064477-3/50004-7.
- [27] R. Macarthur, "Geographic information systems and their use for Environmental Monitoring," *Environmental Monitoring and Characterization*, pp. 85–100, Jan. 2002, doi: 10.1016/B978-012064477-3/50008-4.
- [28] K. Elangovan, *GIS: fundamentals, applications and implementations*. New India Publishing. 2006.
- [29] A. R. Huete, "Remote sensing for Environmental Monitoring," *Environmental Monitoring and Characterization*, pp. 183–206, Jan. 2004, doi: 10.1016/B978-012064477-3/50013-8.
- [30] C. Perez and A. Muñoz, "El factor vegetación en teledetección espacial. Aplicaciones, estrategias y discusión," in *Teledeteccion: nociones y aplicaciones*, 2006.
- [31] D. Coates and M. Smith, "Natural infrastructure solutions for water security," in *Water and the Green Economy. Capacity Development Aspects*, 2012, pp. 167–178.

- [32] D. M. Smith and S. Barchiesi, “Environment as infrastructure – Resilience to climate change impacts on water through investments in nature,” p. 10, 2009.
- [33] B. W. Molina A., Vanacker V., Rosas Barturen M., Bonnesoeur V., Román F., Ochoa-Tocachi B.F., “Infraestructura natural para la gestión de riesgos de erosión e inundaciones en los Andes: ¿ Qué sabemos?,” 2021. <https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2021/06/Infraestructura-natural-para-la-gestion-de-riesgos-de-erosion-e-inundaciones-en-los-Andes.pdf>
- [34] B. Fisher, R. K. Turner, and P. Morling, “Defining and classifying ecosystem services for decision making,” *Ecological Economics*, vol. 68, no. 3, pp. 643–653, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.ECOLECON.2008.09.014.
- [35] MEA, “Ecosystems and Human Well-being: Synthesis Report,” Washington, DC., 2005.
- [36] R. S. de Groot, R. Alkemade, L. Braat, L. Hein, and L. Willemsen, “Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making,” *Ecological Complexity*, vol. 7, no. 3, pp. 260–272, 2010, doi: 10.1016/j.ecocom.2009.10.006.
- [37] J. Maes *et al.*, “An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020,” *Ecosyst Serv*, vol. 17, no. 2016, pp. 14–23, 2016, doi: 10.1016/j.ecoser.2015.10.023.
- [38] K. A. Brauman, G. C. Daily, T. K. de Duarte, and H. A. Mooney, “The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services,” *Annu Rev Environ Resour*, vol. 32, pp. 67–98, 2007, doi: 10.1146/annurev.energy.32.031306.102758.
- [39] R. Costanza *et al.*, “The value of the world’s ecosystem services and natural capital,” *Nature*, vol. 387, no. 6630, pp. 253–260, 1997, doi: <https://doi.org/10.1038/387253a0>.
- [40] Z. Guo, X. Xiao, and D. Li, “An assessment of ecosystem services: Water flow regulation and hydroelectric power production,” *Ecological Applications*, vol. 10, no. 3, pp. 925–936, 2000, doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0925:AAOESW]2.0.CO;2.
- [41] L. D. Llambí, A. Soto-W, R. Célleri, B. De Bievre, B. Ochoa, and P. Borja, *Ecología, hidrología y suelos de páramos*. CONDESAN, 2012.
- [42] J. S. DÍAZ, “La erosión – conceptos básicos,” in *CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS TROPICALES*, 2001, pp. 16–53.

- [43] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, “Risks and Disasters.”
- [44] I. Burton, R. W. Kates, and G. F. White, *The Environment as Hazard*. Guilford press., 1993.
- [45] Organización de los Estados Americanos (OEA), *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado*. Washington, D.C., 1993.
- [46] V. Chow, D. Maidment, and L. Mays, “Hydrologic Processes,” in *Applied Hydrology*, 1988, p. 198.
- [47] B. Ochoa, J. Ciadros, and V. Bonnesoeur, “CUBHIC 2.0: Metodología de cuantificación de humedales,” Lima, 2022.
- [48] S. Harrigan *et al.*, “GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present,” *Earth Syst Sci Data*, vol. 12, no. 3, pp. 2043–2060, Sep. 2020, doi: 10.5194/essd-12-2043-2020.
- [49] W. J. M. Knoben, J. E. Freer, and R. A. Woods, “Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores,” *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 23, no. 10, pp. 4323–4331, Oct. 2019, doi: 10.5194/hess-23-4323-2019.
- [50] N. Shivhare, P. K. S. Dikshit, and S. B. Dwivedi, “A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed,” *Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 643–652, 2018, doi: 10.1016/j.eng.2018.08.012.
- [51] H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, and G. F. Martinez, “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 377, no. 1–2, pp. 80–91, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2009.08.003.
- [52] B. F. Ochoa-Tocachi *et al.*, “Guía de modelación hidrológica para la infraestructura natural,” 2022.
- [53] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations,” *Trans ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885–900, 2007, doi: 10.13031/2013.23153.
- [54] H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, and G. F. Martinez, “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological

- modelling,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 377, no. 1–2, pp. 80–91, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
- [55] R. Hernández, C. Fernández, and P. Baptista, “Definición del alcance de la investigación que se realizará: exploratorio, descriptivo, correlacional o explicativo,” in *Metodología de la investigación*, México, 2006, pp. 88–101.
- [56] Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), “Monitoreo glaciológico en el glaciar Sullcón,” Huaraz, 2016.
- [57] Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), “Monitoreo glaciológico implementación glaciar Paccha,” Huaraz, 2017.
- [58] Autoridad Nacional del Agua (ANA) and R. Ruiz, “Marco metodológico de criterios técnicos para la identificación, delimitación y zonificación de cabeceras de cuenca,” Lima, 2021.
- [59] Ministerio del Ambiente (MINAM) Perú, “Estudio: Diagnóstico de servicios ecosistémicos en la cuenca del río Chillón para la implementación de un Mecanismo de Retribución por Servicios Ecosistémicos,” Lima, 2020.
- [60] F. Vega-Jácome, W. S. Lavado-Casimiro, and O. G. Felipe-Obando, “Assessing hydrological changes in a regulated river system over the last 90 years in Rimac Basin (Peru),” *Theor Appl Climatol*, vol. 132, no. 1–2, pp. 347–362, Apr. 2018, doi: 10.1007/s00704-017-2084-y.
- [61] P. Rau *et al.*, “Hydroclimatic change disparity of Peruvian Pacific drainage catchments,” *Theor Appl Climatol*, vol. 134, no. 1–2, pp. 139–153, Oct. 2018, doi: 10.1007/s00704-017-2263-x.
- [62] K. M. Alencar da Silva Alves and R. Silva Nóbrega, “Tendencia Pluviométrica Y Concentración Estacional De Precipitación En La Cuenca Hidrográfica Del Río Moxotó – Pernamcuco – Brasil,” *Revista Geográfica de América Central*, vol. 1, no. 58, p. 295, 2017, doi: 10.15359/rgac.58-1.12.
- [63] T. Lucia, B. Alves, P. Vieira De Azevedo, and A. Aires De Farias, “Comportamento da Precipitação Pluvial e sua Relação com o Relevo nas Microrregiões do Cariri Oriental e Ocidental do Estado da Paraíba (Rainfall Behavior Rain and Its Relationship with Relief in the Regions Cariri of Eastern and Western State of Paraíba),” *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 8, no. 6, pp. 1601–1614, 2015, doi: 10.5935/1984-2295.20150090.

- [64] C. Gómez, “Naturalización de caudales aplicados a la generación de energía hidroeléctrica en la cuenca del río Rímac,” 2017. Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3411/gomez-moreno-cecilia-del-pilar.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [65] T. Condom, P. Rau, and J. C. Espinoza, “Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998-2007,” *Hydrol Process*, vol. 25, no. 12, pp. 1924–1933, Jun. 2011, doi: 10.1002/hyp.7949.
- [66] P. Rau, “hydRopclim: An R package for easy hydroclimatic calculations.,” 2023.
- [67] METER, “Mini Disk Manual,” 2021. Accessed: Feb. 28, 2023. [Online]. Available: https://publications.metergroup.com/Manuals/20421_Mini_Disk_Manual_Web.pdf
- [68] R. Zhang, “Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 61, no. 4, pp. 1024–1030, Jul. 1997, doi: 10.2136/sssaj1997.03615995006100040005x.
- [69] R. Carsel, “Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics ,” *Water Resour Res*, vol. 24, May 1998.
- [70] M. Vuille, E. Franquist, R. Garreaud, W. S. Lavado Casimiro, and B. Cáceres, “Impact of the global warming hiatus on Andean temperature,” *J Geophys Res*, vol. 120, no. 9, pp. 3745–3757, 2015, doi: 10.1002/2015JD023126.
- [71] W. S. Lavado Casimiro, J. Ronchail, D. Labat, J. C. Espinoza, and J. L. Guyot, “Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 625–642, May 2012, doi: 10.1080/02626667.2012.672985.
- [72] M. Acuña, “Modelo de simulación de flujo estacionario del sistema hidrogeológico Ticlio,” *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, vol. 11, pp. 60–67, 2008.
- [73] M. Otto and R. E. Gibbons, “Potential Effects of Projected Decrease in Annual Rainfall on Spatial Distribution of High Andean Wetlands in Southern Peru,” *Wetlands*, vol. 37, no. 4, pp. 647–659, Aug. 2017, doi: 10.1007/s13157-017-0896-2.
- [74] M. J. Monge-Salazar *et al.*, “Ecohydrology and ecosystem services of a natural and an artificial bofedal wetland in the central Andes,” *Science of the Total Environment*, vol. 838, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155968.

- [75] E. Oyague, D. J. Cooper, and E. Ingol, “Effects of land use on the hydrologic regime, vegetation, and hydraulic conductivity of peatlands in the central Peruvian Andes,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 609, p. 127687, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2022.127687.
- [76] K. Broersma, J. A. Robertson, and D. S. Chanasyk, “Effects of different cropping systems on soil water properties of a boralf soil,” *Commun Soil Sci Plant Anal*, vol. 26, no. 11–12, pp. 1795–1811, Jun. 1995, doi: 10.1080/00103629509369409.
- [77] B. F. Ochoa-Tocachi *et al.*, “Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments,” *Hydrol Process*, vol. 30, no. 22, pp. 4074–4089, Oct. 2016, doi: 10.1002/hyp.10980.
- [78] W. Buytaert *et al.*, “Human impact on the hydrology of the Andean páramos,” *Earth Sci Rev*, vol. 79, no. 1–2, pp. 53–72, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.earscirev.2006.06.002.
- [79] R. Trancoso, J. R. Larsen, C. McAlpine, T. R. McVicar, and S. Phinn, “Linking the Budyko framework and the Dunne diagram,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 535, pp. 581–597, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.JHYDROL.2016.02.017.

ANEXOS

ANEXO 1: Código en R: Extracción de P/ Tmax. /Tmín. del producto PISCO

```
214 # #####
215 # TEMPERATURA MÁXIMA PISCO #
216 # #####
217
218 Pisco.tmax.brick <- brick("TmaxMon.nc")# leer netcdf con brick
219 Pisco.tmax.brick # Enero de 1981 hasta dic 2016
220 nlayers(Pisco.tmax.brick)
221 splot(Pisco.tmax.brick[[1:12]]) # los datos del primer año 1-12 meses
222 t.cuenca.mensual <- extract(Pisco.tmax.brick, cuenca.wgs, fun=mean, snap="out") #para extraer la data
223 t.cuenca.mensual
224 row.names(pp.cuenca.mensual) <- cuenca.wgs@data$NOMB_UH_N4
225 view(t.cuenca.mensual)
226 range(t.cuenca.mensual)
227
228 tmax.cuenca.mensual <- extract(Pisco.tmax.brick, cuenca.wgs, fun=mean)
229 row.names(t.cuenca.mensual) <- cuenca.wgs@data$NOMB_UH_N4
230 write.csv(t(tmax.cuenca.mensual),'Tmax.csv') #Creamos el archivo .csc con la data
231
232 #convertir datos de Tmax
233 # de vertical en horizontal
234 datos_eto <- read.csv("Tmax.csv")
235 datos_eto
236 dat_eto=datos_eto[,2]
237 mdat_eto=t(matrix(dat_eto,nrow = 12))
238 length(mdat_eto)
239 colnames(mdat_eto)
240 # cambiando los nombres de columnas y filas
241 colnames(mdat_eto) <- c('ENE', 'FEB', 'MAR', 'ABRI', 'MAY', 'JUN', 'JUL', 'AGO', 'SEP', 'OCT', 'NOV', 'DIC')
242 rownames(mdat_eto)<-1981:2016 # para que le asigne los años en la data
243 mdat_eto
244 write.csv(mdat_eto,"Tmax.csv")
---
```

Nota: Se utiliza el mismo código para la extracción de las variables: Tmax, Tmín y P.

ANEXO 2: Código en GEE: Extracción de ETP

Codigo EVP -FAO *
Get Link Save Run Reset Apps

```

Imports (2 entries)
var AdI: Table users/fabrizziouillar/Cuanca_Yuracmayo
var PISCOeo_pm_monthly: ImageCollection users/lgutierrezlf/PISCOeo_pm/monthly

1 Map.setCenter(-76.1146, -11.8736,11);
2 //Llamamos a la colección y argumentamos los filtros
3 var PISCOeo_pm_monthly = ee.ImageCollection('users/lgutierrezlf/PISCOeo_pm/monthly')
4   .filterDate('1984-01-01', '2016-01-01')
5   .filterBounds(AdI)
6   .map(function(image){return image.clip(AdI)})
7 // Seleccionamos la variables 'b1' donde se encuentra el valor de la ETP
8 var EVT = PISCOeo_pm_monthly.select('b1');
9 // Agregamos una paleta de colores para una mayor visualización
10 var EVTvis = {
11   min: 0,
12   max: 150,
13   palette: ['0300ff', '418504', 'efff07', 'efff07', 'ff0303'],
14 };
15 Map.addLayer(EVT,EVTvis)

```

Inspector Console Tasks

Use print(...) to write to this console.

Codigo EVP -FAO *
Get Link Save Run Reset Apps

```

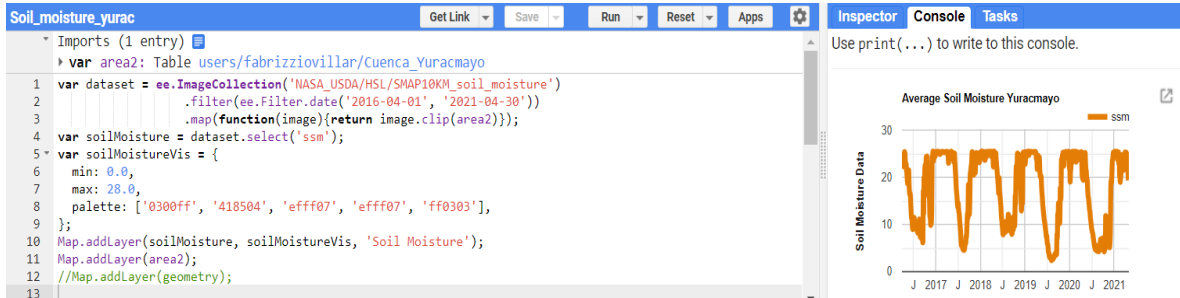
16 // Generamos la serie de tiempo mensual
17 var chart =
18   ui.Chart.image
19   .series({
20     imageCollection: EVT,
21     region: AdI,
22     reducer: ee.Reducer.mean(),
23     scale: 500,
24     xProperty: 'system:time_start'
25   })
26   .setSeriesNames(['b1'])
27   .setOptions({
28     title: 'Promedio area de la ETP en Yuracmayo',
29     hAxis: {title: 'Date', titleTextStyle: {italic: false, bold: true}},
30     vAxis: {
31       title: 'ETP (mm/mes)',
32       titleTextStyle: {italic: false, bold: true}
33     },
34     lineWidth: 5,
35     colors: ['e37d05', '1d6b99'],
36     curveType: 'function'
37   });
38 print(chart);
39 //Map.addLayer(geometry);
40

```

Inspector Console Tasks

Use print(...) to write to this console.

ANEXO 3: Código en GEE: Extracción de SMAP



ANEXO 4: Código en GEE: Cálculo de extensión de bofedales

```
INDICE NDVI_L8 *
Get Link Save Run Reset Apps

Imports (3 entries)
  var l8: ImageCollection "USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 OLI Raw Scenes"
  var AdI: Table users/fabrizzioivillar/Cuanca_Yuracmayo
  var imageCollection: ImageCollection "USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 Raw Scenes"

1 //UBICARNOS EN EL CENTRO DEL MAPA
2 Map.setCenter(-76.14, -11.84, 10)
3 Map.addLayer(AdI.style({color: '00FFFF', width: 1, fillColor: 'FFFF00', lineType:
4 'dashed'}), {}, 'VUB');
5 //EXTRAER IMÁGENES LANDSAT Y FILTRAR
6 var LS8_collec = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
7   .filterDate('2013-06-01', '2013-08-30')
8   .filterBounds(AdI)
9   .map(function(image){return image.clip(AdI)})
10  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER',20))
11  .filterMetadata('IMAGE_QUALITY_OLI', 'greater_than', 7)
12 print(LS8_collec)
13
14 //PROMEDIAR VALORES
15 var median_pix = c.median()
16 var median_pix_clip = median_pix.clip(AdI)
17
18 //DESIGNAR UNA PALETA DE COLORES
19 var palette = [ 'FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F18555', 'FCD163',
20 '998718', '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201',
21 '004C00', '023801', '012E01', '011D01', '011D01', '011301']
22
```

```
INDICE NDVI_L8 *
Get Link Save Run Reset Apps

22 //FUNCIÓN NDVI
23 var ndvi = median_pix_clip.normalizedDifference(['B5','B4'])
24 Map.addLayer(ndvi,{min:-1, max:1,palette:palette},'NDVI')
25 //DEFINIR RANGOS DE VALORES NDVI
26 var thresholds = ee.Image([-0.2, 0, 0.1, 0.31, 0.6, 1]); //Define the thresholds
27 var classified = ndvi.gt(thresholds).reduce('sum').toInt(); //Create the classified Image
28 print(classified, 'Classified');
29 //Define PARÁMETROS DE VISUALIZACIÓN
30 var classifiedParams = {min: 0, max: 6, palette: ['blue', 'f7e084', '6f6f6f', 'LimeGreen', 'Yellow', '111111']};
31 Map.addLayer(classified.clip(AdI), classifiedParams, 'Classified');
32 // CUENTA DEL NÚMERO DE PÍXELES
33 var allpix = classified.updateMask(classified);
34 var pixstats = allpix.reduceRegion({
35   reducer: ee.Reducer.count(), // CONTAR TODOS LOS PÍXELES PARA CADA CLASE
36   geometry: AdI,
37   scale: 30,
38   maxPixels: 1e15
39 });
40 var allpixels = ee.Number(pixstats.get('sum')); // EXTRAER UN PÍXEL COMO NÚMERO
```

INDICE NDVI_L8 * Get Link Save Run Reset Apps ⚙

```
39   });
40   var allpixels = ee.Number(pixstats.get('sum')); // EXTRAER UN PIXEL COMO NÚMERO
41
42   var arealist = [];
43   // FUNCIÓN PARA VISUALIZAR MEJOR LOS RESULTADOS
44   var areacount = function(cnr, name) {
45     var singleMask = classified.updateMask(classified.eq(cnr)); // mask a single class
46     var stats = singleMask.reduceRegion({
47       reducer: ee.Reducer.count(),           // CONTAR PÍXELES POR CLASE
48       geometry: AdI,
49       scale: 30,
50       maxPixels: 1e10
51     });
52     var pix = ee.Number(stats.get('sum'));
53     var hect = pix.multiply(900).divide(1000000); // Landsat pixel = 30m x 30m --> 900 sqm
54     var perc = pix.divide(allpixels).multiply(10000).round().divide(100);
55     arealist.push({Class: name, Pixels: pix, Area: hect, Percentage: perc});
56   };
57
```

The map displays a geographical area with a central region highlighted in green and brown, representing the NDVI results. The map includes labels for various locations: San Miguel de Viso, Tamboraque, Chocha, Yura, Huay-Huay, Matucana, and SUITOCANCHA. Roads are marked with numbers 22 and 120. The background shows a topographic map with green and brown terrain. The map is titled 'INDICE NDVI_L8 *' and has a toolbar with buttons for 'Get Link', 'Save', 'Run', 'Reset', and 'Apps'.

ANEXO 5: Código en Python: Extracción de caudales del producto GloFAS

```
In [44]: # Importamos las librerías y llamamos la data de caudales diarios de un año determinado
import pandas as pd
grbs= pygrib.open("1995.grib")
ts = xr.open_dataset('1995.grib', engine='cfgrib')
days=len(ts.time)+1
# Creamos el bucle para que acceda a todos los días del año (archivo .grib) en nuestra área de estudio
for i in range(1,days):
    grb = grbs[i]
# Ubicamos el área de nuestro proyecto
    lat, lon, tolerance = -11.83, -76.12, 0.05
    data, lats, lons = grb.data(lat1=lat-tolerance,lat2=lat+tolerance,
                                lon1=lon-tolerance,lon2=lon+tolerance)
#Imprimimos los caudales diarios
    print(data.mean())
```

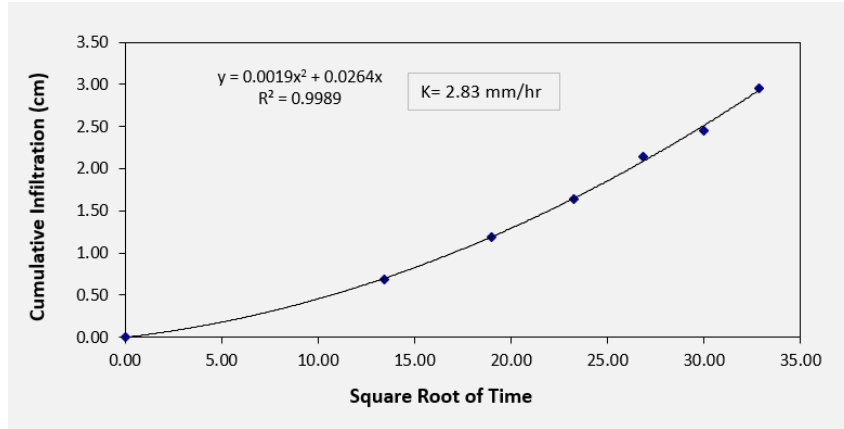
```
6.4453125
7.4296875
6.1796875
4.609375
3.8828125
4.0
```

ANEXO 6: Tabla de extensión de bofedales en Yuracmayo

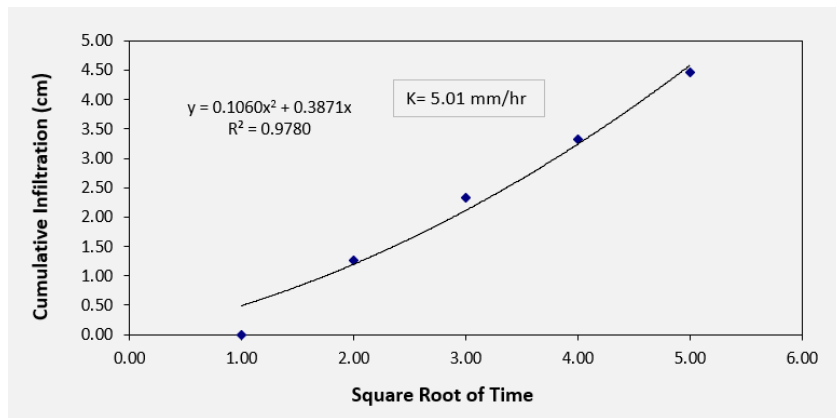
	Años	Área Yuracmayo (km ²)	Área Aycagranga (km ²)	Porcentaje de nubosidad	Meses
LC05	1990	0.68	0.23	<10%	JJA
	1991	0.22	0.06	<10%	JJA
	1992	0.04	0.02	<10%	JJA
	1993	1.54	0.52	<10%	JJA
	1994	0.27	0.14	<10%	JJA
	1995	0.92	0.37	<10%	JJA
	1996	0.33	0.17	<10%	JJA
	1997	0.25	0.13	<10%	JJA
	1998	0.7	0.29	<10%	JJA
	1999	0.41	0.18	<10%	JJA
	2000	0.35	0.14	<10%	JJA
	2001	0.26	0.14	<10%	JJA
	2002				
	2003	0.16	0.08	<10%	JJA
	2004	0.29	0.13	<10%	JJA
	2005	0.07	0.04	<10%	JJA
	2006	0.46	0.17	<20%	JJA
	2007	0.4	0.05	<10%	JJA
	2008	0.15	0.08	<10%	JJA
	2009	1.47	0.69	<10%	JJA
2010	0.01	0.01	<20%	JJA	
2011	0.41	0.24	<15%	JJA	
2012					
LC08	2013	0.64	0.33	<10%	JJA
	2014	2.66	1.1	<10%	JJA
	2015	3.36	1.23	<10%	JJA
	2016	0.68	0.27	<15%	JJA
	2017	2.43	0.97	<15%	JJA
	2018	2.49	0.98	<15%	JJA
	2019	1.92	0.84	<15%	JJA
	2020	0.68	0.32	<10%	JJA
	2021	1.38	0.67	<10%	JJA

ANEXO 7: Curvas de infiltración

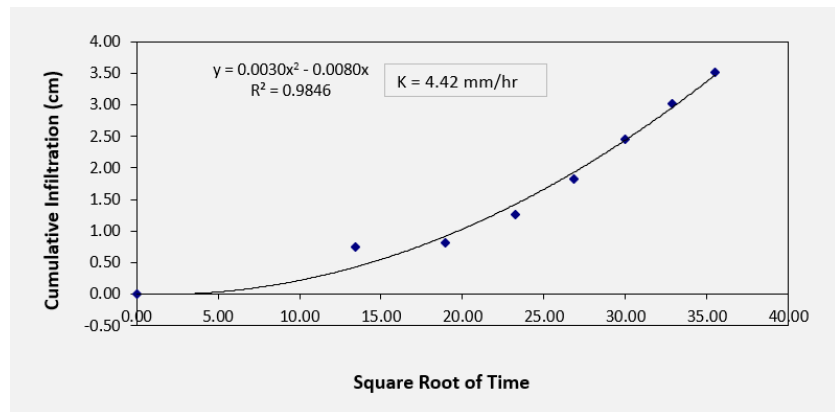
Ayca 11:



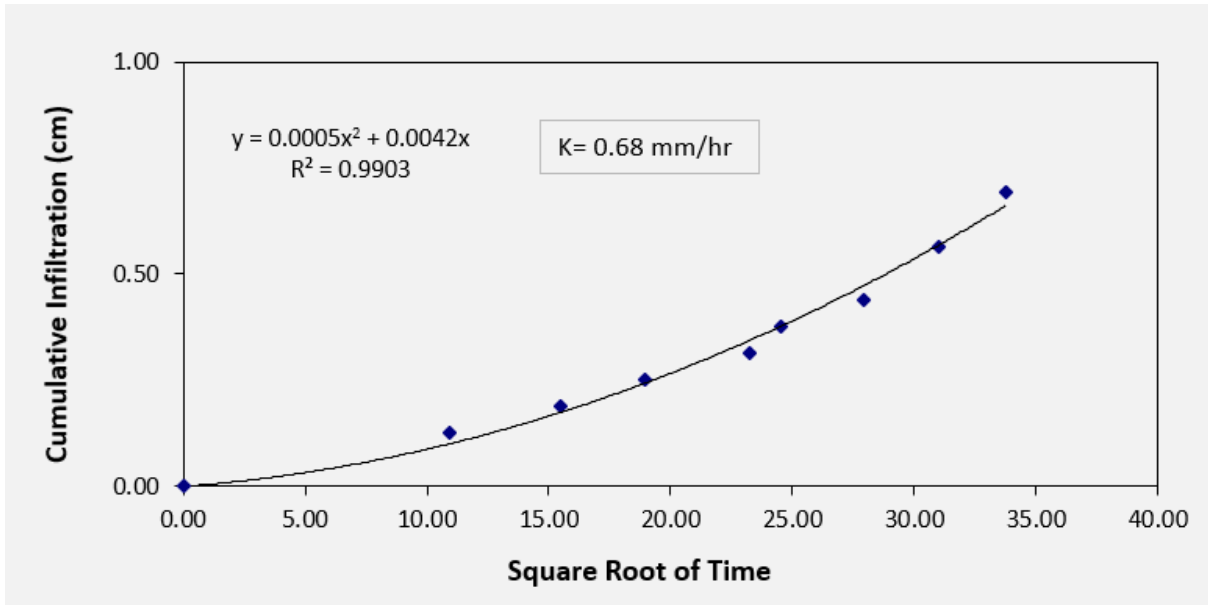
Ayca 12:



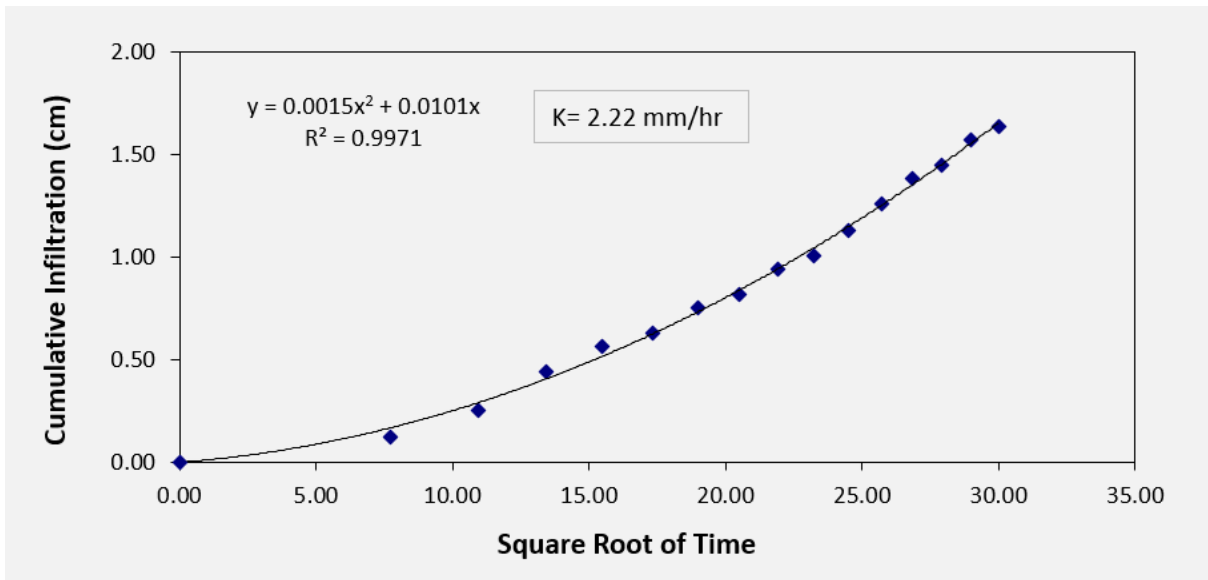
Ayca 13:



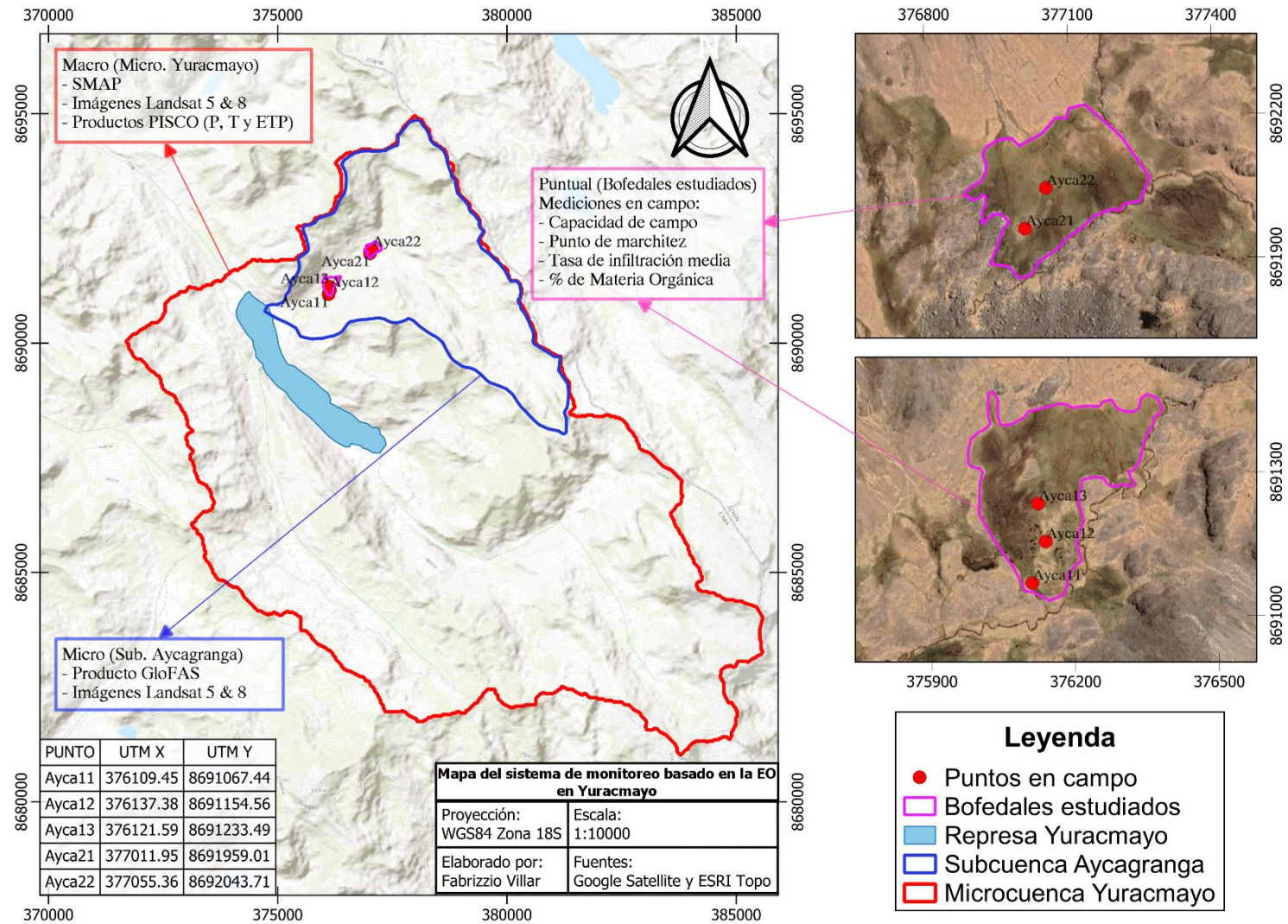
Ayca 21:



Ayca 22:



ANEXO 8: Mapa del Sistema de Monitoreo ambiental basado en la EO



ANEXO 9: Registro fotográfico de actividades en campo



Desembocadura de la quebrada Aycagranga en la represa Yuracmayo



Colecta de muestras de suelos en bofedales



Medición de la tasa de infiltración media con el infiltrómetro minidisco