

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

Entregable 5: Reporte técnico



Foto: R.I. Meneses (2012)

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

Versión 2021.5.2

Stockholm Environment Institute: Bart (A.J.) Wickel, PhD, Jeanne Fernandez, MSc, Marisa Escobar, PhD, Ana Cecilia Escalera

Fecha: Febrero, 2021

Contenidos

1	Introducción.....	6
1.1	Enfoque del estudio	6
1.2	Área de estudio	7
1.3	Los bofedales altoandinos.....	7
1.3.1	Características de la vegetación	7
1.3.2	Procesos eco-hidrológicos	8
1.3.3	Servicios ecológicos proporcionados.....	9
1.3.4	Desafíos para el manejo y la conservación.....	9
1.4	Estructura del reporte	11
2	Geodatabases para la cuenca Katari.....	12
2.1	Datos existentes	12
2.2	Generación de datos adicionales para el área de estudio	13
2.2.1	Datos Topográficos	14
2.2.2	Análisis de terreno	16
2.2.3	Delimitación de cuencas	16
2.3	Revisión de datos climáticos en la cuenca Katari.....	17
2.3.1	GMET en Bolivia	17
2.3.2	Validación de datos GMET en Katari.....	18
2.4	Geodatabase y productos climáticos finales.....	20
3	Análisis espaciotemporal de los bofedales con datos satelitales	21
3.1	Principios de la teledetección	21
3.1.1	Landsat	21
3.1.2	Aplicación de las bandas espectrales para monitoreo ambiental	22
3.2	Índices espectrales en este estudio	22
3.2.1	NDVI	23
3.2.2	MNDWI/NDSI	23
3.2.3	Resumen de índices	25
3.3	Procesamiento de datos Landsat para el estudio	25
3.3.1	Acceso a datos Landsat y selección de imágenes	25
3.3.2	Paso de filtración final	27
3.4	Análisis de vegetación y agua de Bofedales.....	28
3.4.1	Variaciones temporales del NDVI	28

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

3.4.2	Variaciones temporales del NDVI con el clima	30
3.4.3	Variaciones temporales de MNDWI	32
3.4.4	Variaciones temporales del NDVI y del MNDWI.....	33
3.4.5	Clasificación de los bofedales con datos topográficos	34
3.4.6	Variaciones del NDVI por tipo de vegetación	37
3.5	Análisis de Nieve	40
3.5.1	Área de los glaciares al nivel regional.....	41
3.5.2	Área de los glaciares al nivel local	43
3.5.3	Indicadores de cambio climático	44
3.6	Análisis de Agua.....	45
3.7	Conclusiones sobre el análisis de bofedales y glaciares	45
4	Modelo conceptual WEAP	47
4.1	Delimitación de Cuencas	47
4.2	Información Base.....	49
4.2.1	Climatología	49
4.2.2	Uso de Suelo	51
4.2.3	Aporte de Glaciares.....	51
4.3	Demandas de agua	52
4.3.1	Consumo Humano	52
4.3.2	Demanda de ganadería.....	53
4.3.3	Demanda de Riego.....	54
4.4	Representación de Bofedales en WEAP.....	55
4.5	Incorporación de elementos estructurales	57
4.6	Resultados preliminares del modelo WEAP	57
4.6.1	Jacha Jahuira	57
4.6.2	Khullu Kachi.....	58
5	Conclusiones y recomendaciones.....	60
6	Referencias.....	63
7	Apéndices.....	65
7.1	Apéndice 1. Resumen de datos y productos.....	65
7.2	Apéndice 2. Resumen imágenes satelitales	66
7.3	Apéndice 3. Resultados del análisis de GMET en Katari	68
7.4	Apéndice 4. Resultados preliminares obtenidos por el modelo WEAP	73

7.5 Apéndice 5. Planillas de visualización de datos 75

1 Introducción

El proyecto ‘Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari’ tiene como meta principal el desarrollo de un conjunto de datos espaciales para realizar un análisis multitemporal de ecosistemas de “bofedales” en la cuenca Katari, Bolivia y observar las características de este tipo de vegetación. El análisis se complementa con el uso de herramientas de modelación al nivel conceptual, las cuales podrán servir para evaluar las demandas y la oferta de agua en la cuenca para interferir con los requerimientos ecológicos de estos ecosistemas y analizar opciones de manejo sostenible de los recursos hídricos que tomen en cuenta los ecosistemas de bofedales.

1.1 Enfoque del estudio

Este proyecto propone estudiar los bofedales altoandinos en la cuenca Katari mediante el análisis de datos espaciales. Las tres preguntas que han guiado la investigación son:

1. ¿Cuál información y cuáles datos hidrológicos, geográficos, demográficos etc. están disponibles en la zona de la cuenca Katari para un estudio de sus recursos hídricos?
2. ¿Qué podemos aprender de las características eco-hidrológicas de los bofedales a través de datos de sensores remotos?
3. ¿Cómo desarrollar conceptualmente el balance hídrico de la cuenca Katari y preparar las bases de un modelo hidrológico que podrá integrar a futuro una mejor representación de los bofedales?

El presente estudio se entiende como una primera etapa de la investigación, la cual podrá ser más profundizada a través de un trabajo de validación en terreno y recolección de datos hidrológicos para calibrar y validar un modelo avanzado de la cuenca. El alcance de este estudio permite generar un enfoque metodológico que puede ser extendido a otras regiones de Bolivia con presencia de ecosistemas de bofedales. Desde la evaluación de datos existentes, hasta la caracterización eco-hidrológica, y finalizando con el desarrollo conceptual, el proceso avanzado en este estudio es un marco útil para el entendimiento de las necesidades hídricas y aportes de suministro de los bofedales.

Como es común en la generación de herramientas de planeación de agua, este estudio genera una base preliminar de información la cual debe ser validada con datos de campo y sobre la cual se debe iterar una vez se operacionalice el uso de las herramientas de planeación. En la respuesta a estas preguntas de investigación se realizaron importantes avances como son la generación de una geodatabase, la generación de herramientas de visualización como Tableau y el desarrollo conceptual de una aplicación de WEAP. La innovación lograda en este estudio es un valor agregado que el equipo de investigación logró que va más allá de una respuesta a unos requerimientos de consultoría y que permite al avance de la ciencia aplicada en recursos hídricos en Bolivia. Este logro fue posible además debido a la dedicación de los actores locales, quienes, a pesar de los retos administrativos de sus funciones, contribuyeron con su tiempo, información y conocimiento. De esta forma los resultados finales se lograron a través de una coproducción conjunta que permite un apropiamiento local y que es el punto de partida para seguir con la validación y trabajo de campo recomendados como pasos siguientes.

1.2 Área de estudio

El proyecto se encuentra ubicado en el departamento de La Paz, Provincia Los Andes, en los municipios de Batallas y Pucarani. El área de proyecto cubre una superficie total de 706,31 km², que corresponde al área de influencia directa del “Proyecto Multipropósito de Riego y Agua Potable para los Municipios de Batallas, Pucarani y El Alto” (proyecto Multipropósito).

Las microcuencas del proyecto Multipropósito están delimitadas en Ilustración 1. La figura muestra también la ubicación de los bofedales, glaciares y cuerpos de agua de la región. Se nota que los bofedales se encuentran ubicados en particular en las regiones altas de aquellas subcuencas que tienen presencia de glaciares.

A continuación, presentamos información contextual sobre los ecosistemas de bofedales para enfatizar la importancia de estos ecosistemas y la urgencia de su monitoreo y manejo sostenible.

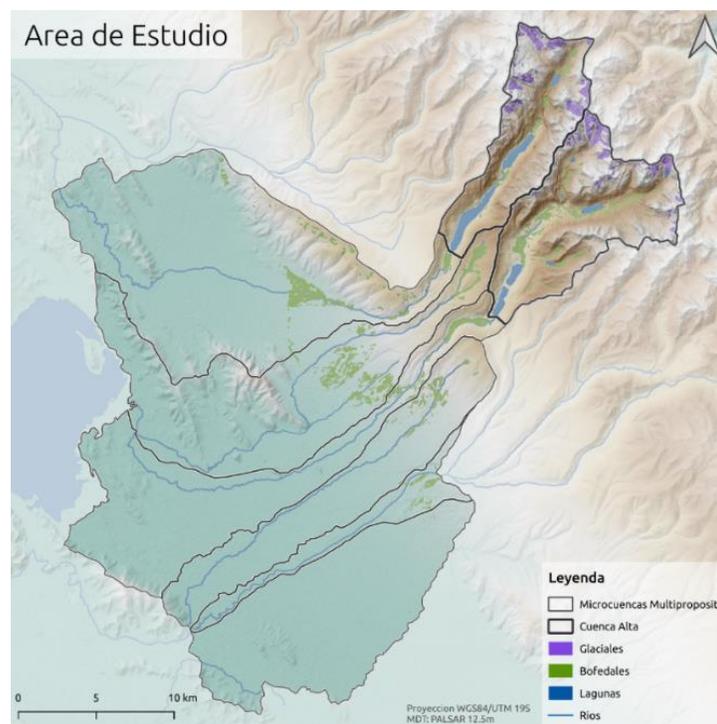


Ilustración 1 Ubicación del área de estudio

1.3 Los bofedales altoandinos

1.3.1 Características de la vegetación

El término ‘bofedales altoandinos’ hace referencia a humedales que se encuentran a grandes altitudes en la Cordillera tropical de los Andes. Los bofedales se componen de comunidades de plantas hidrófilas que crecen en las llanuras planas a lo largo de arroyos y manantiales. Se caracterizan por una humedad constante del suelo, capas subyacentes de turba y un verdoso persistente durante todo el año. (Fonkén, 2015)

Existe mucha diversidad de comunidades vegetales, como describe Fonkén (2015) en los Altos Andes peruanos, que van desde turberas con o sin musgos y arbustos, hasta pastizales de arroyos

y prados. En la Cordillera Real, en Bolivia, las principales comunidades vegetales son *Distichia* spp. y *O. andina*. (Loza Herrera et al., 2015; Meneses et al., 2015).



Ilustración 2 Bofedal altoandino permanente (Fuente: R.I. Meneses, 2012)

1.3.2 Procesos eco-hidrológicos

Los bofedales se caracterizan por dos aspectos ecológicos principales: humedad del suelo y topología (MINAM, 2019). Esta humedad permite categorizar los bofedales en dos tipos: los bofedales permanentes, que generalmente son turberas; y bofedales estacionales, menos profundos y con menor capacidad de almacenamiento de carbono y agua. La topología, en particular la pendiente, puede determinar la estacionalidad de los bofedales. En las zonas inclinadas tienden a ser más estacionales, mientras que, en valles y áreas planas, los bofedales reciben la escorrentía de las laderas circundantes y entonces suelen ser más profundos y permanentes.

Hidrológicamente, los bofedales funcionan como recurso de almacenamiento de agua dado que retienen el agua de las cuencas aguas arriba. Esta agua proviene de la precipitación, del derretimiento de los glaciares, interacción con acuíferos, y el aporte de fuentes superficiales como de ríos y lagos. (Squeo et al., 2006) Varios estudios han encontrado que la mayoría de los bofedales son alimentados por fuentes de agua subterránea. Cooper et. al (2010) estudió humedales andinos en Perú, cerca de Cajamarca, y observó que la mayoría de los humedales recibían descargas de aguas subterráneas proviniendo de pequeños acuíferos.

Los mecanismos hidrológicos de almacenamiento pueden ser comparados con una esponja que absorbe el agua en época húmeda y luego la libera en la época seca (Verzija y Quispe, 2013). En efecto, el agua fluye lentamente a través de los bofedales hacia las cuencas aguas abajo y suele ser filtrada a través del suelo. (Fonkén, 2015) Por lo tanto, los bofedales proveen un efecto de regulación esencial del flujo de agua y servicios de filtración de agua.

1.3.3 Servicios ecológicos proporcionados

El papel de los bofedales es esencial para los medios de vida y servicios ambientales. Además de ser esenciales para la filtración y el almacenamiento del agua, los bofedales ofrecen servicios de captura de carbono y son una fuente de agua y alimentos, durante todo el año, para llamas, ovejas y otros animales domésticos en las regiones Andinas.

Según ICUN (2017), la turbera de los bofedales puede almacenar cantidades considerables de dióxido de carbono de la atmósfera cada año, fijándolo en tejidos vegetales y encerrándolo en los suelos. A nivel mundial, la capacidad de almacenamiento de carbono de las áreas de turberas representa más del 40% de todo el carbono del suelo. Por esta razón, las turberas y los bofedales en particular son uno de los ecosistemas terrestres más valiosos en la lucha contra el cambio climático. Desafortunadamente, alrededor del 15% de las turberas del mundo han sido drenadas y esto ha causado la liberación de los gases de efecto invernadero que se almacenaban en el suelo (IUCN, 2017).

1.3.4 Desafíos para el manejo y la conservación

Varias actividades humanas representan una amenaza para los bofedales como el sobrepastoreo, el corte de turba, la minería y la construcción de presas, tuberías de suministro de agua, embalses y carreteras. En particular, la construcción de embalses (por ejemplo, para suministrar agua a ciudades de crecimiento rápido aguas abajo) afecta el suministro de agua a los bofedales. (Fonkén, 2015).

Según Meneses et al. (2015) los bofedales en el valle de La Paz están altamente fragmentados y se están secando debido a la sobreexplotación. Esto representa un riesgo para los animales domesticados y salvajes que dependen de los bofedales como recurso alimentario, así como para los usuarios de agua en las cuencas hidrográficas como la cuenca Katari.

Un desafío mayor es el cambio climático. Afectará a las comunidades y diferentes ecosistemas que dependen del agua del derretimiento de los glaciares, entre los cuales se encuentran los bofedales. Esto es el caso de las ciudades de La Paz y El Alto que tienen como principal fuente de suministro el agua de los glaciares (Ramírez 2008, citados en Herrera y al., 2015), posiblemente filtrada por los bofedales altoandinos.



Ilustración 3 Tipos de vegetación: *Distichia muscoides* (izquierda) y *Oxychloe Andina* (derecha) (Fuente: R.I. Meneses, 2013)

En varios estudios se ha demostrado que ciertas plantas son más tolerantes al déficit hídrico y que el retroceso de los glaciares afectará la diversidad de las comunidades vegetales. En Bolivia, las especies más vulnerables de *Distichia* spp. podrían ser reemplazadas por comunidades más

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

resistentes de *O. andina*. Pero tanto *Distichia* como *O. andina* ya están clasificadas "en peligro de extinción" al nivel nacional. (Loza Herrera et al., 2015).

1.4 Estructura del reporte

En el contexto actual de incertidumbre y preocupación por el futuro de los bofedales, este proyecto de monitoreo hidro-ecológico es un primer paso hacia un mejor entendimiento de los procesos eco-hidrológicos que caracterizan los bofedales. En este reporte se encuentra estructurado siguiendo las tres preguntas principales de investigación indicados en sección 1.1 de la siguiente manera:

- **Sección 2:** Se indica cuales fueron los datos usados en el presente estudio para estudiar la cuenca Katari, incluyendo bases de datos existentes y datos adicionales para ampliar las geodatabases (Sección 2). Una documentación más detallada de estos datos se encuentra en los entregables 2.1, 2.2.
- **Sección 3:** Se explica el análisis espaciotemporal de los bofedales realizado en base a datos de sensores remotos. La base de este análisis también se encuentra documentada por parte en el Entregable 2.3 mientras que el presente reporte detalla los resultados.
- **Sección 4:** Se explica en detalle el desarrollo de un modelo conceptual de la cuenca Katari: Las componentes del modelo y que tipo de información fue utilizada.
- **Sección 5:** Recomendaciones para próximos pasos y estudios futuros.

2 Geodatabases para la cuenca Katari

La base de datos generada en el marco de este proyecto consiste en la recopilación de datos existentes complementada y ampliada con datos multitemporales de plataformas satelitales y otras fuentes de información disponibles. Estos datos se podrán integrar en el modelo conceptual WEAP. Esta sección resume la información presentada en los entregables 2.1 y 2.2 sobre la construcción de una geodatabase para el área de estudio y el análisis de datos GMET.

2.1 Datos existentes

La primera etapa de la construcción de una geodatabase para la cuenca fue revisar la geodatabase y documentación proporcionada por la UGCK/MMAYa, la Unidad Ejecutora del Programa Multipropósito (GPM de EMAGUA) y otras entidades involucradas. La Tabla 1 presenta un detalle de los datos proporcionados que fueron la base del sistema de información elaborado. En particular las geodatabases FUNDEPCO y PDCK fueron el punto de partida para la geodatabase final dado que están en el formato de gestión de datos geográficos adecuado.

Tabla 1 Resumen de datos proporcionados por la UGCK/BID/GPM

Nombre del archivo	Descripción	Formato
04 Info Hugo Soliz	Datos Piezómetros	Excel
06 FUNDEPCO Multipropósito	Geodatabase	SIG (.gdb)
Aforos GPM	Datos hidrológicos	Excel y pdf
Censo Agropecuario	Datos agropecuarios	Excel y Shapefile (Ganadería)
Hidrología Khullu Khachi	Datos hidrológicos	Reporte Word y apéndices Excel
Hidrología Taypi Chaca	Datos hidrológicos	Reporte Word y apéndices Excel
PDCKyLMT.gdb	Geodatabase	SIG (.gdb)
BOFEDALES- Rosa Iselda	Informes y geodatabase (dañado)	Varios reportes Word, Excel, pdf, SIG dañado

Tabla 2 Comparación de las Geodatabases FUNDEPCO y PDCK

Geodatabase FUNDEPCO	Geodatabase PDCK
• Acuíferos	• Atmosfera
• Áreas de Riego	• Biótico
• Asociaciones de Regantes	• Bolivia
• Bofedales	• Clima
• Calidad de Bofedales	• Geología
• Clases de Rios	• Geomorfología
• Concesiones Mineras	• Hidrogeología
• Geología	• Hidrología
• Glaciales	• Paisaje
• Heladas	• Proyectos
• Lagunas	• Suelos
• Mapa Potencial	• Topografía
• Microcuencas	
• Monitoreo de Agua	
• Rios	
• Servicios Básicos	
• Uso de la Tierra	

La Tabla 2 compara los archivos FUNDEPCO y PDCK. Las listas en la tabla corresponden a las capas SIG incluidas en cada geodatabase. La base de datos FUNDEPCO contiene la información detallada y más pertinente para la región del proyecto multipropósito, mientras que la geodatabase PDCK es más completa, pero hay menos datos específicos relevantes al proyecto Multipropósito. En la Tabla 2, subrayamos en azul los datos que hemos considerado más importantes para la modelación hídrica y en verde para el análisis de bofedales y las otras unidades espaciales de interés. La Ilustración 4 ilustra estas unidades identificadas como principales para el estudio.

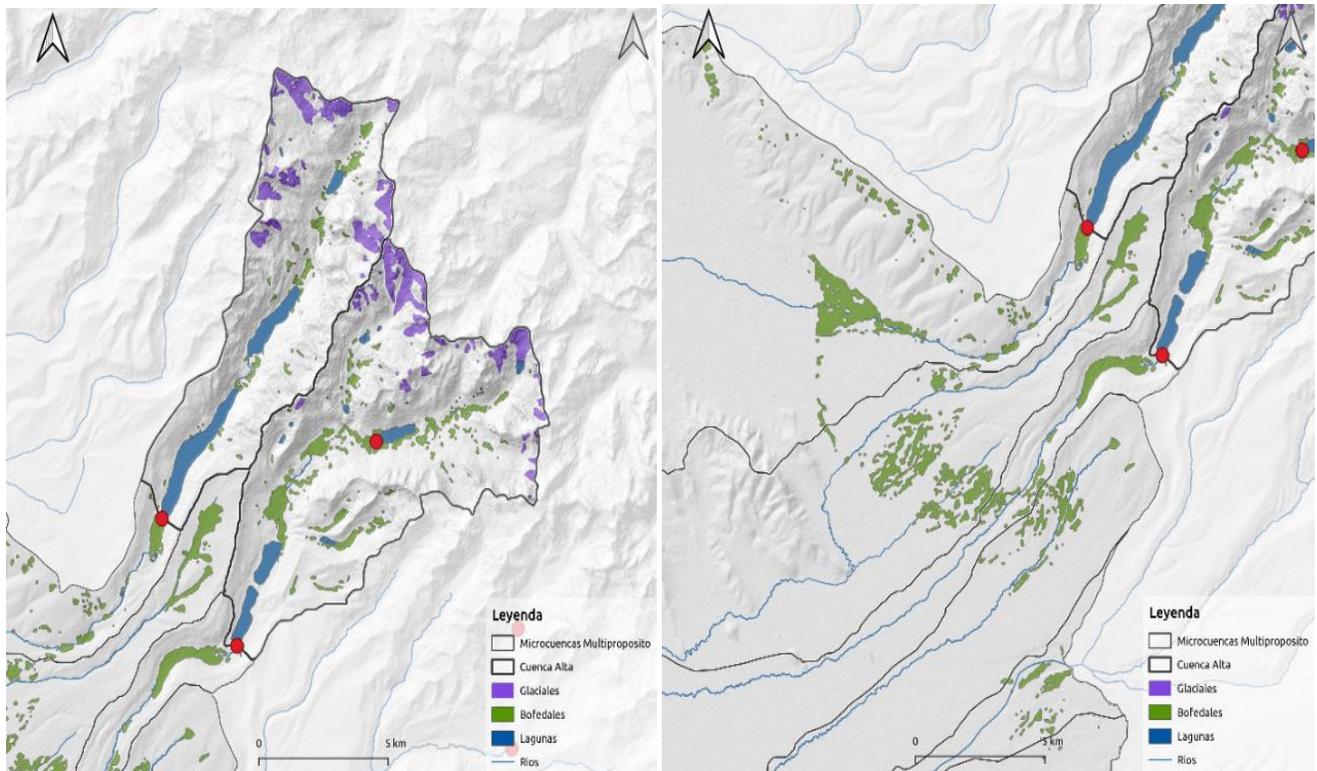


Ilustración 4 Unidades espaciales principales

2.2 Generación de datos adicionales para el área de estudio

Para la base de datos final de este proyecto, agregamos la siguiente información a las geodatabases existentes:

- Datos topográficos
- Un análisis de terreno
- Una delimitación de cuencas complementaria
- Mapas de unidades principales

A continuación, se describe la elaboración de estos datos.

2.2.1 Datos Topográficos

La región de la cuenca Katari y del proyecto multipropósito tiene una topografía muy compleja. Para completar las bases de datos existentes, se hizo un análisis topográfico usando varios Modelos Digitales de Elevación (MDE) con mayor resolución.

Los cuatro mejores MDE disponibles actualmente y de utilidad para el análisis son detallados en la Tabla 3. Todos los productos (MERIT, ALOS PALSAR, ALOS World 3D, HydroSHEDS) fueron generados con datos de sensores remotos, pero tienen características distintas según la técnica empleada para producirlos, lo cual puede influir en su aplicabilidad.

Tabla 3 Características de los sensores y productos topográficos

Modelo Digital de Elevación	Escala espacial (m)	Productos generados
ALOS PALSAR FBS Hi-res terrain corrected¹	12.5	<ul style="list-style-type: none"> • DEM • Hillshade
ALOS World 3D (AW3D30)²	30	<ul style="list-style-type: none"> • Aspect • Slope
MERIT DEM³	90	<ul style="list-style-type: none"> • Topographic Position Index (TPI)
HydroSHEDS	90	<ul style="list-style-type: none"> • Topographic Roughness Index (TRI) • Topographic Water Index (TWI)

La comparación de los perfiles de elevación basados en los distintos modelos muestra las diferencias de resolución horizontal y vertical (Ilustración 5 e Ilustración 6). Se puede observar una buena compatibilidad entre los tres modelos. El modelo ALOS PALSAR 12.5m requiere un ajuste vertical consistente de 51m (resultando en 'ALOS 12.5m corregido'), pero una vez ajustado puede ser considerado el modelo más correcto y es más apto para estudios a escalas locales. Los productos MERIT y AWD3D son de alta calidad y pueden servir para analices requiriendo información menos fina.

¹ <https://vertex.daac.asf.alaska.edu>

² <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>

³ http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM/

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

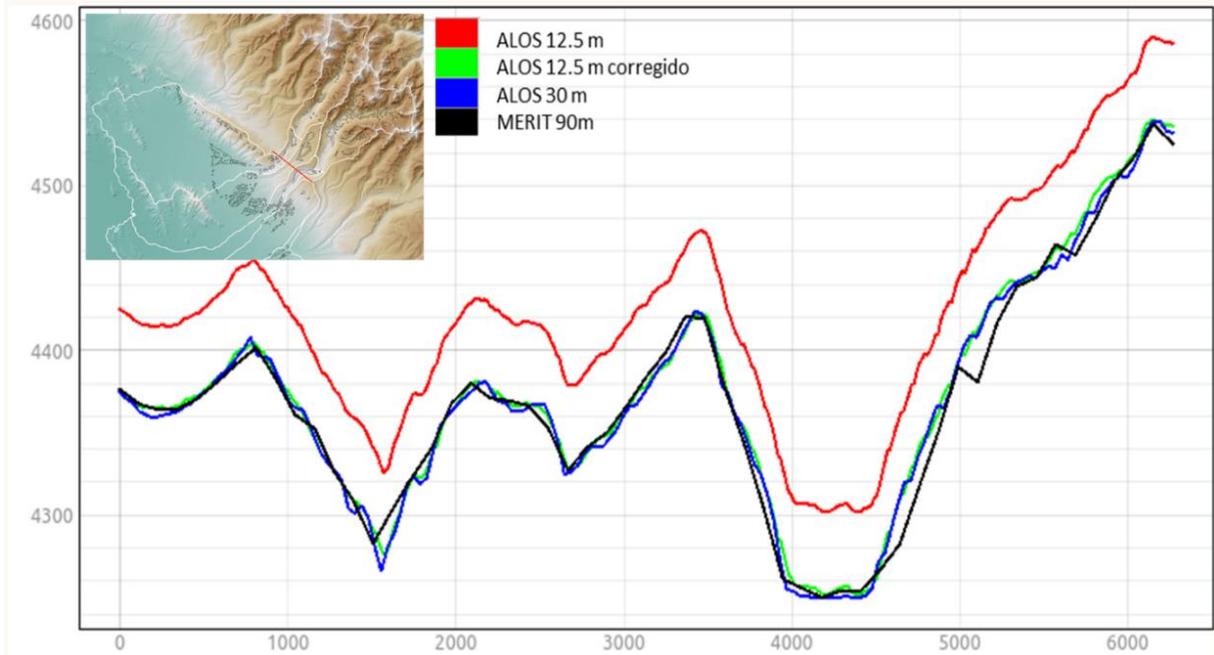


Ilustración 5 Perfil de los modelos de terreno (NW a SE)

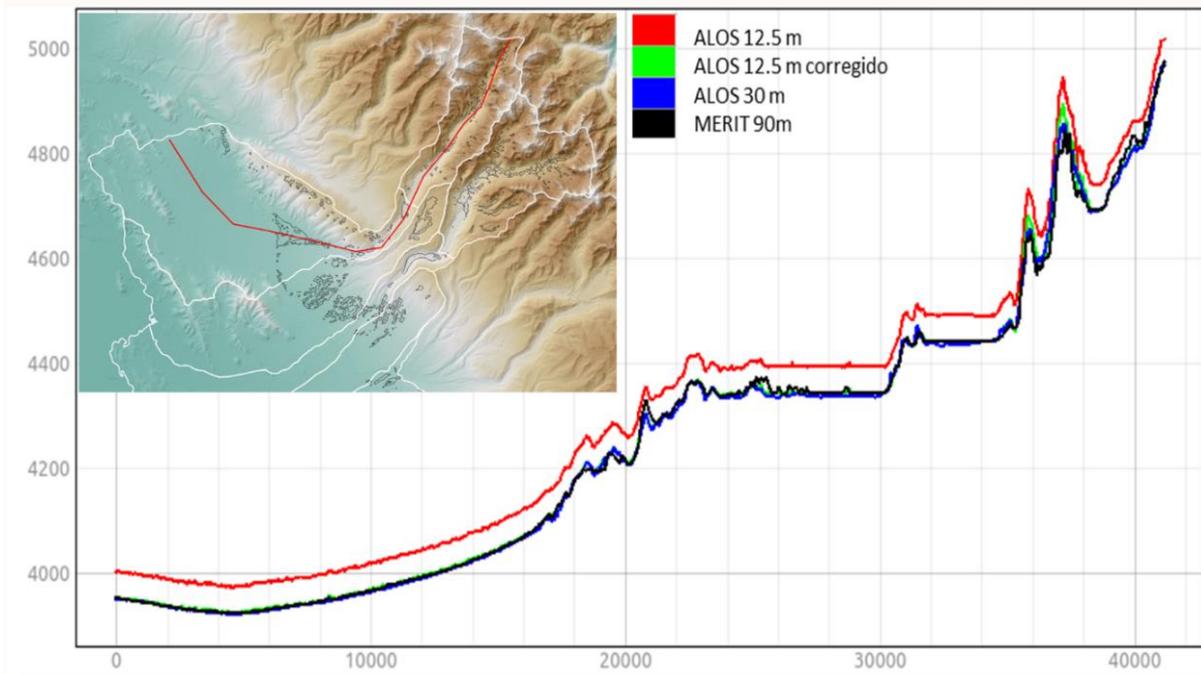


Ilustración 6 Perfil altitudinal de la cuenca Khara Khota usando 3 modelos de elevación

2.2.2 Análisis de terreno

Partiendo de los tres mejores MDEs (MERIT, ALOS 30m y ALOS 12.5m), fueron generados los juegos de productos de análisis de terreno listados en la Tabla 3 y fueron agregados a la geodatabase final. La Ilustración 7 muestra un ejemplo de mapas de pendiente (Slope) y su coincidencia con Bofedales

Los productos topográficos y de análisis de terreno sirvieron para evaluar las características de las unidades de bofedales y glaciares en este proyecto. En específico, los productos del MDE ALOS 30m sirviere para clasificar los bofedales según la elevación y la pendiente. A cada unidad de bofedal fue asociado un valor de altura y un valor de pendiente correspondiendo a promedios para el área del bofedal. Esto sirvió en la Sección 3 sobre el análisis de datos espectrales de los bofedales.

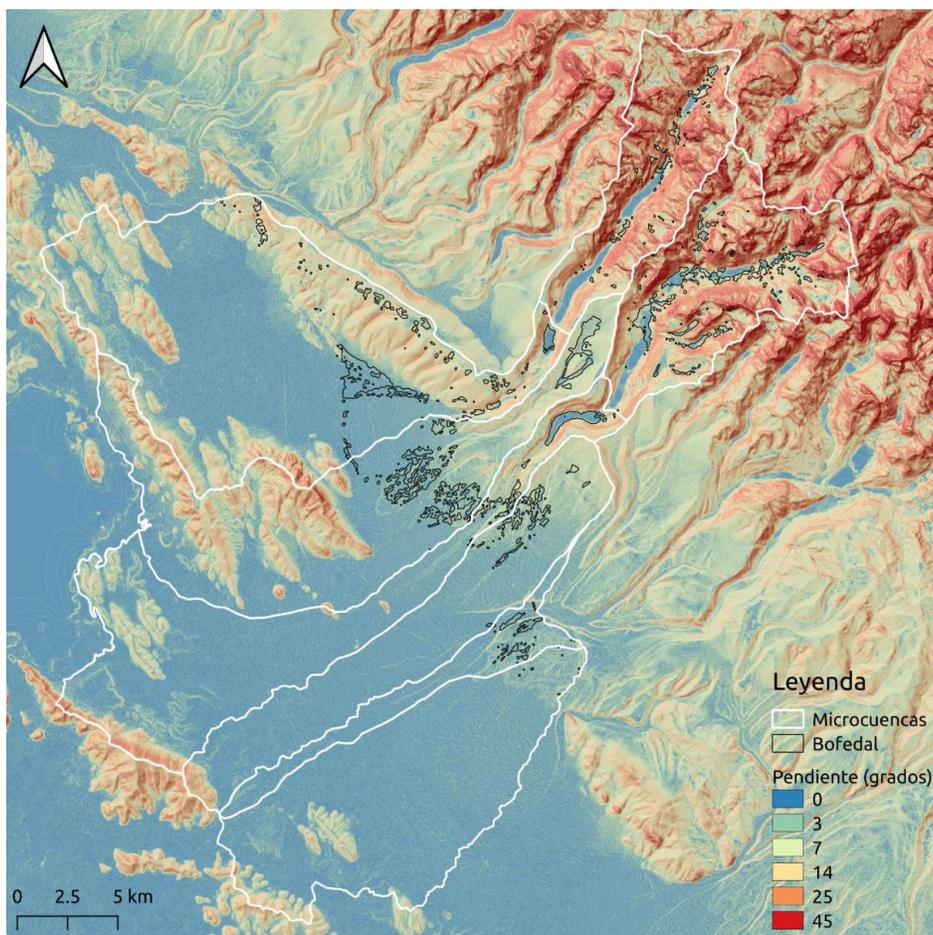


Ilustración 7 Pendiente de terreno regional

2.2.3 Delimitación de cuencas

Se ha hecho una delimitación de cuencas complementaria en base a los tres MDEs. La nueva delimitación coincide en gran parte con el mapa de las microcuencas proporcionado por la UGCK (Ilustración 8). Se observan pequeñas inconsistencias, pero principalmente en la parte baja de la cuenca. Estas pueden ser corregidas con más conocimiento local.

Hay que tomar en cuenta que el modelo hidrológico WEAP desarrollado (ver Sección 3) usa la delimitación HydroSHEDS, incorporada en la herramienta, lo cual implica ciertas diferencias con la nueva delimitación propuesta en la geodatabase. En general, la delimitación en WEAP presentada en la Sección 3 es similar para Hichu Khota, Taypi Chaca, y las microcuencas 1, 2, 3.



Ilustración 8 Comparación de delimitación de cuencas: producto actual del UGCK, ALOS 30m (AWD3D) y ALOS 12.5m

2.3 Revisión de datos climáticos en la cuenca Katari

En cuanto a la disponibilidad de datos climáticos en la cuenca Katari, revisamos la aplicabilidad de la herramienta GMET “Gridded Meteorological Ensemble Tool”. GMET se integra directamente en WEAP y es un producto oficial manejado por el Ministerio de Medio ambiente y Agua de Bolivia (MMAyA) para estudios de balance hidrológicos.

La herramienta GMET permite la generación de grillas de precipitación y temperatura con una gran resolución espacial y temporal (e.g. 0.05 grados, diario). A diferencia de otras metodologías tradicionales de interpolación, esta herramienta aplica una interpolación probabilística (Clark & Slater, 2006) y entonces proporciona estimaciones consistentes con las incertidumbres espaciotemporales (Newman et al., 2015). GMET usa atributos geofísicos (elevación, pendiente y aspecto) y un enfoque de regresión lineal múltiple de carácter extensible (Newman et al., 2015).

2.3.1 GMET en Bolivia

En 2017, el Instituto Medioambiental de Estocolmo (SEI), en una colaboración cercana con el MMAyA, el Instituto Nacional de Investigaciones Atmosféricas de los Estados Unidos (NCAR) y

otros socios académicos de Bolivia, aplico la herramienta GMET por primera vez fuera de los Estados Unidos, dentro del marco del proyecto “Balance Hidrológico Superficial de Bolivia 1986-2016” (BHSB). Se generó una base de datos de precipitación y temperatura con una resolución espacial de 0.05 grados cubriendo todo el territorio nacional (GMET-Bolivia), y con una resolución temporal diaria cubriendo el periodo 1980-2016.

Después de 2017, GMET ha sido aplicado en el desarrollo de diferentes Planes Directores de Cuenca (Proyecto Bolivia WATCH; Plan Director Rio Rocha) y el desarrollo del Plan Especial de Sequias para las ciudades de La Paz/El Alto (EPSAS, 2019).

2.3.2 Validación de datos GMET en Katari

Para evaluar el desempeño de los valores de precipitación obtenidos con GMET en Katari, se hizo uso de un set de 8 estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca y sus alrededores (Ilustración 9). La red de monitoreo meteorológico de la UGCK incluye 2 estaciones adicionales (Mina Paloco y Taypichaca) pero el paso de tiempo en el registro histórico es mensual, lo cual no es suficiente para la validación de GMET a paso diario.

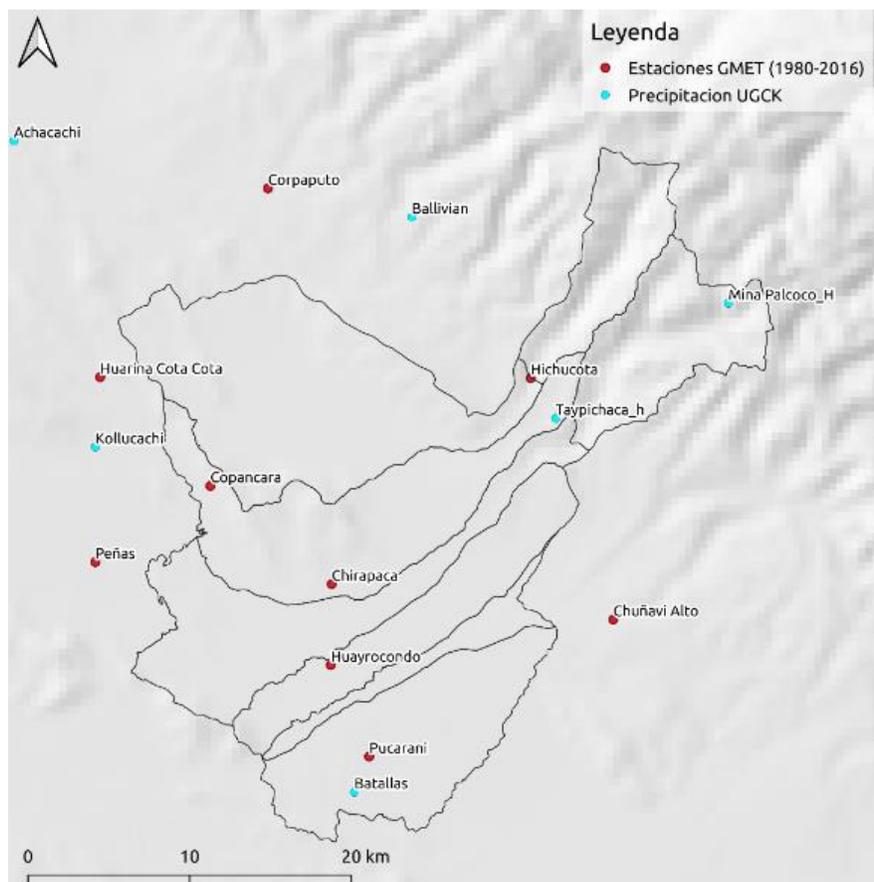


Ilustración 9 Estaciones meteorológicas

En el Entregable 2.2 y en el Apéndice 2 se presentan con más detalle los resultados de la validación y la comparación entre los valores de precipitación observados en cada estación meteorológicas vs. los valores obtenidos por GMET, a paso diario y agregación mensual. La Tabla 4 muestra un resumen de los indicadores estadísticos de correlación y R^2 .

Tabla 4 Resumen de valores de correlación y R2 obtenidos para cada estación

Estación	Lat	Long	Agregacion Diaria		Agregacion Mensual	
			R2	Correlacion	R2	Correlacion
BO2013	-16.25	-68.55	0.34	0.58	0.73	0.85
BO2019	-16.3	-68.5	0.45	0.67	0.84	0.92
BO2021	-16.2	-68.4	0.47	0.69	0.87	0.93
BO2047	-16.05	-68.55	0.56	0.75	0.86	0.93
BO2057	-16.3	-68.35	0.49	0.7	0.81	0.9
BO2068	-16.3	-68.65	0.42	0.65	0.8	0.9
BO2074	-16.4	-68.45	0.46	0.68	0.86	0.93
BO2157	-16.35	-68.5	0.55	0.74	0.88	0.94

Para valores de precipitación diaria, la correlación entre GMET y las observaciones de las estaciones es considerablemente baja. Esto está relacionado con la naturaleza estocástica de GMET y el hecho de que el ensamble generado está compuesto por solo 30 miembros, un número aceptable pero no óptimo. Los resultados de GMET son el producto del promedio de los 30 ensambles. Como toda herramienta de naturaleza probabilística, mientras más miembros tenga en ensamble de salida, más confiable será el resultado. Un factor adicional es la aleatoriedad natural de la ocurrencia de lluvia a nivel diario/sub diario. Es bien sabido que el que hoy sea un día lluvioso no significa que mañana también lo sea (baja persistencia) o que, de aquí a un año en esta fecha exacta, también sea un día lluvioso.

Por otro lado, la correlación entre valores de precipitación agregados a nivel mensual muestra mejores resultados en cuanto a la dispersión y el coeficiente de determinación (R^2). A diferencia que, con la precipitación diaria, se pueden esperar valores de precipitación mensual similares de año a año, puesto que la agregación a este paso de tiempo amortigua la variabilidad que se presenta a nivel diario para esta variable meteorológica. Por lo que es de esperar que haya una mejor representación de la precipitación mensual por parte de GMET que de la precipitación diaria.

Un valor de R^2 por debajo de 0.85 para una agregación mensual se puede considerar como un valor aceptable. Se observa que todas las estaciones tienen un R^2 por encima de este valor, siendo la estación BO2013 la que cuenta con el valor más bajo correspondiente a 0.85. Esto puede estar relacionado con una exagerada dispersión de valores de precipitación en esta estación por encima de 210 mm, donde se registraron valores mensuales de precipitación considerablemente más altos que en otras estaciones, que potencialmente corresponderían a eventos de precipitación aislados.

En general, se observa un patrón de incremento de dispersión para aquellos valores mensuales de precipitación que están por encima de los 20mm/día y 120 mm/mes, siendo el incremento más marcado a nivel diario que mensual. Esto estaría relacionado que valores por encima este límite podrían ser interpretados como “extremos” considerando la climatología de la región reflejada a través de las series históricas de precipitación.

En términos generales, es evidente que GMET subestima la precipitación registrada por las estaciones evaluadas. Sin embargo, los valores de correlación y R^2 son un indicador de que GMET es capaz de predecir considerablemente bien los valores de precipitación a nivel mensual de la región de estudio, lo cual es de mayor interés para el estudio propuesto.

2.4 Geodatabase y productos climáticos finales

La geodatabase revisada y ampliada con datos adicionales satelitales se encuentra en el servidor ftp. El producto final es una selección de capas relevantes para el estudio complementadas con capas derivadas del análisis topográfico.

Los resultados del análisis GMET se encuentran documentados en el Entregable 2.2.

3 Análisis espaciotemporal de los bofedales con datos satelitales

El enfoque principal del proyecto ha sido evaluar la aplicación de los datos Landsat y sus productos derivados para observar las características de los bofedales altoandinos. Se ha generado series de tiempo de índices para cada unidad de bofedal (NDVI, MNDWI) y para los glaciares (NDSI) de la cuenca Katari. En esta sección se presentan las características del satélite Landsat, el proceso de generación de las series de tiempo de índices satelitales y el análisis de estos datos.

3.1 Principios de la teledetección

3.1.1 Landsat

La misión Landsat de la NASA empezó en los años 70, generando la serie temporal de datos satelitales más larga en la historia (Ilustración 10). Desde Landsat 5, las características de los sensores han sido más o menos comparables, permitiendo la elaboración de productos compatibles y cierta consistencia en las series de tiempo.

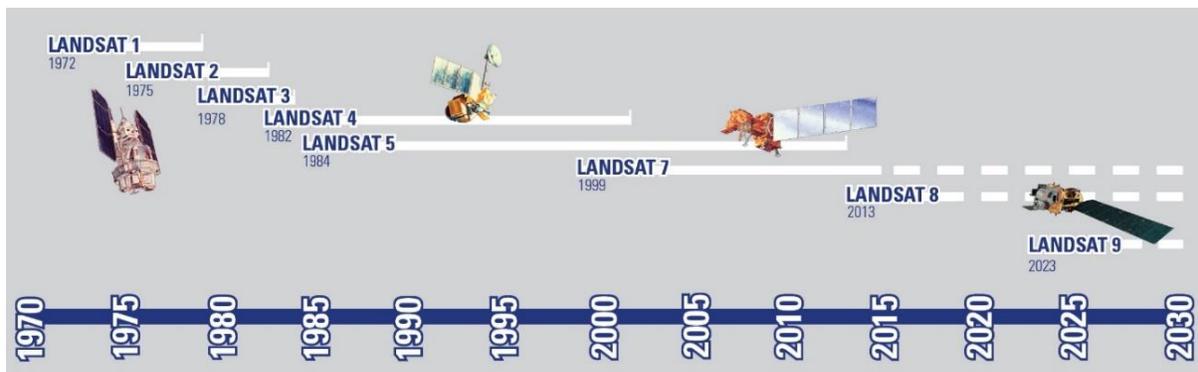


Ilustración 10 Historia de los sensores Landsat

Los sensores Landsat cuentan con bandas espectrales específicas que miden distintas partes del espectro óptico (Ilustración 11).

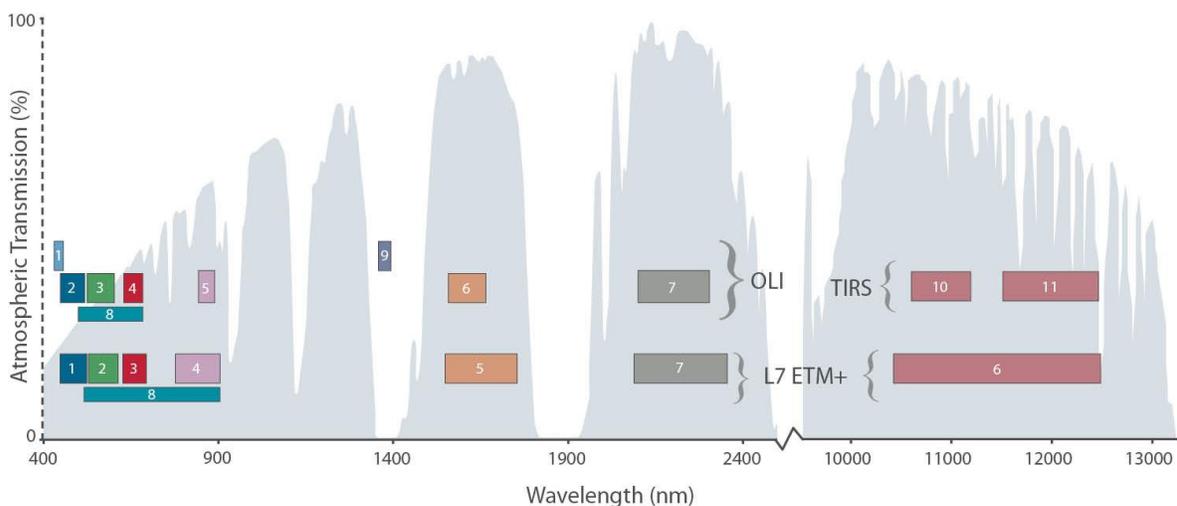


Ilustración 11 Bandas espectrales de Landsat 5 y 7 (ETM y ETM+) y Landsat 8

La Tabla 5 indica la correspondencia entre las bandas de las varias generaciones de Landsat.

Tabla 5 Nombres de las bandas Landsat, su longitud de onda y resolución espacial

Landsat 4 & 5 TM			Landsat 7 ETM+			Landsat 8 OLI			
Banda	No	μ	m	No	μ	m	No	μ	m
Aerosol							1	0.433–0.453	30
Blue	1	0.45-0.52	30	1	0.45-0.515	30	2	0.450–0.515	30
Green	2	0.52-0.60	30	2	0.525-0.605	30	3	0.525–0.600	30
Red	3	0.63-0.69	30	3	0.63-0.69	30	4	0.630–0.680	30
NIR	4	0.76-0.90	30	4	0.775-0.90	30	5	0.845–0.885	30
SWIR-1	5	1.55-1.75	30	5	1.55-1.75	30	6	1.560–1.660	30
TIRS-1	6	10.41-12.5	120	6	10.4-12.5	60	10	10.60-11.19	100
TIRS-2							11	11.50-12.51	100
SWIR-2	7	2.08-2.35	30	7	2.08-2.35	30	7	2.100–2.300	30
Panchromatic	8			8	0.52-0.9	15	8	0.500–0.680	15
Cirrus							9	1.360–1.390	30

3.1.2 Aplicación de las bandas espectrales para monitoreo ambiental

Algunas propiedades físicas de cada tipo de cobertura de suelo pueden ser medidas a través del espectro electromagnético. Suelo, vegetación, agua, construcciones y demás elementos absorben, reflejan y dispersan la energía electromagnética (EM) de forma diferente.

Los sensores satelitales como Landsat están diseñados para medir las longitudes de onda de la energía electromagnética reflejada por el suelo. Combinando los datos de varias bandas individuales, se puede enfatizar las características de la superficie terrestre. Se puede por ejemplo hacer combinaciones lineales de bandas o también usar la ratio entre bandas distintas (enfoque “banda-radio”) para contrastar las respuestas espectrales de varios tipos de cobertura de suelo y resaltar elementos como vegetación o cuerpos de agua.

Por ejemplo, para extraer información relacionada con el agua existen varios métodos, generalmente divididos de acuerdo con el número de bandas que se utilice: métodos para imágenes de banda simple y métodos para imágenes multibanda (Xu, 2006). El Índice de Vegetación Normalizada (NDVI), introducido por Tucker (1979), es probablemente el índice banda-radio más conocido y utilizado para aplicaciones tales como el contraste de bandas rojas y casi infrarrojas de vegetación y biomasa.

3.2 Índices espectrales en este estudio

Los índices procesados en este estudio fueron el NDVI, el MNDWI, y el NDSI. En los siguientes párrafos, incluimos la descripción del EVI porque podría ser aplicado en estudios futuros.

3.2.1 NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un índice de vegetación estandarizado que permite la generación de imágenes que muestran el “verdor” relativo de la cobertura de suelo. Por eso es considerado como un indicador indirecto de biomasa. Debido a la absorción de luz roja por parte de la clorofila presente en las hojas y la alta reflectancia de la luz Infrarroja cercana (NIR), el NDVI permite distinguir áreas con y sin vegetación. Es uno de los indicadores derivados de sensores remotos más comunes para el monitoreo de vegetación y ha sido aplicado en numerosos estudios ecosistémicos.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

En nuestro estudio, el producto NDVI coincide con los límites de los bofedales delimitados por la UGCK (Ilustración 12).

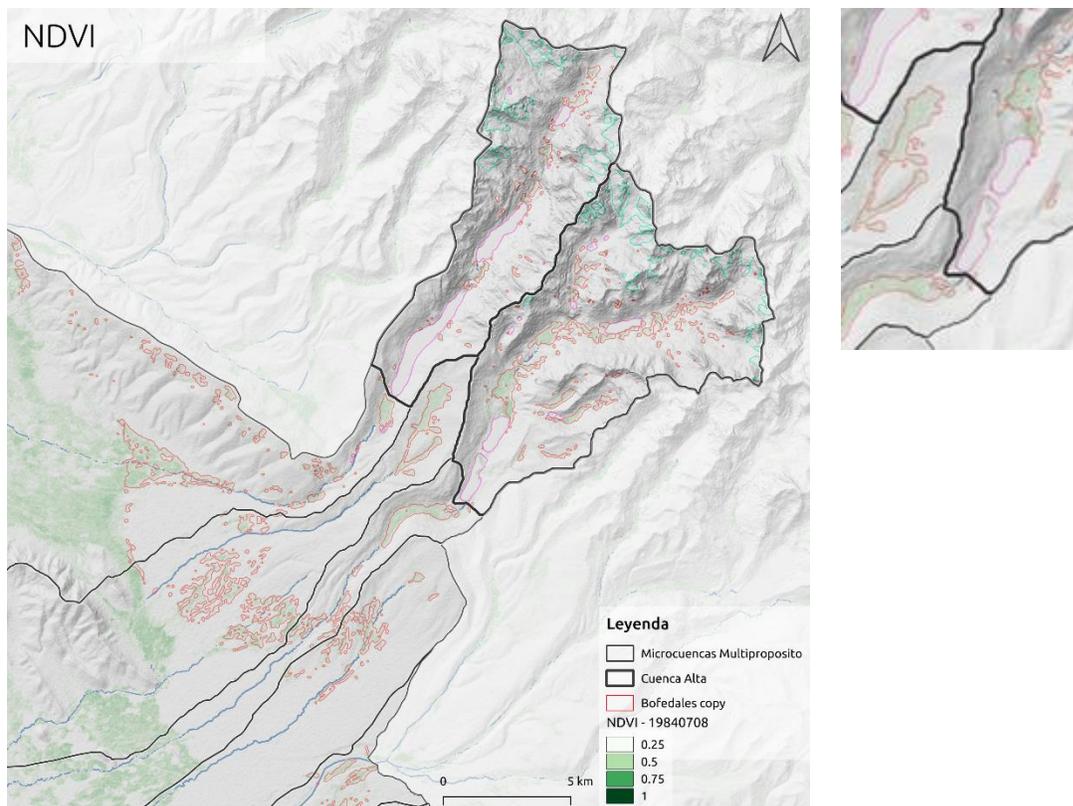


Ilustración 12 Ejemplo del producto NDVI en base de una imagen Landsat 5 para la región del estudio y la coincidencia con los límites de los Bofedales actuales (UGCK). Mayor densidad de vegetación resulta en valores más cerca de un valor 1

3.2.2 MNDWI/NSDI

El índice de nieve de diferencia normalizada (NSDI) fue propuesto originalmente por Hall et al. (1995), normalizando la banda verde y la banda infrarroja de onda corta (SWIR1) con datos MODIS. El Índice de Diferencia de Agua Normalizado Modificado (MNDWI) es una variación de la misma combinación de bandas y una ampliación del índice original NDWI (Mcfeeters, 1996) cual usa el infrarrojo medio en vez del casi-infrarrojo (Xu, 2006).

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

Aunque el NDSI y el MNDWI usan la misma ecuación, en términos de tecnología de teledetección, fueron diseñados para mapear diferentes tipos de cobertura terrestre. Se puede explicar la ecuación del MNDWI y del NDSI de la manera siguiente:

- La nieve refleja la luz visible mucho más que la luz medio-infrarroja.
- Los cuerpos de agua reflejan mucho más en la banda verde que en la banda medio-infrarroja.

El MNDWI general resultados altamente positivos para cuerpos de agua superficiales. Xu (2006) sugiere que los valores de MNDWI por encima de 0.09 corresponden a agua superficial y que el MNDWI podría ser útil para la detección de diferencias en calidad de agua dado que la salinidad influye en su valor.

$$MNDWI/NDSI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$$

En nuestro estudio, el producto MNDWI/NDSI coincide con los límites de las lagunas y de los glaciares delimitados por la UCGK (Ilustración 13)

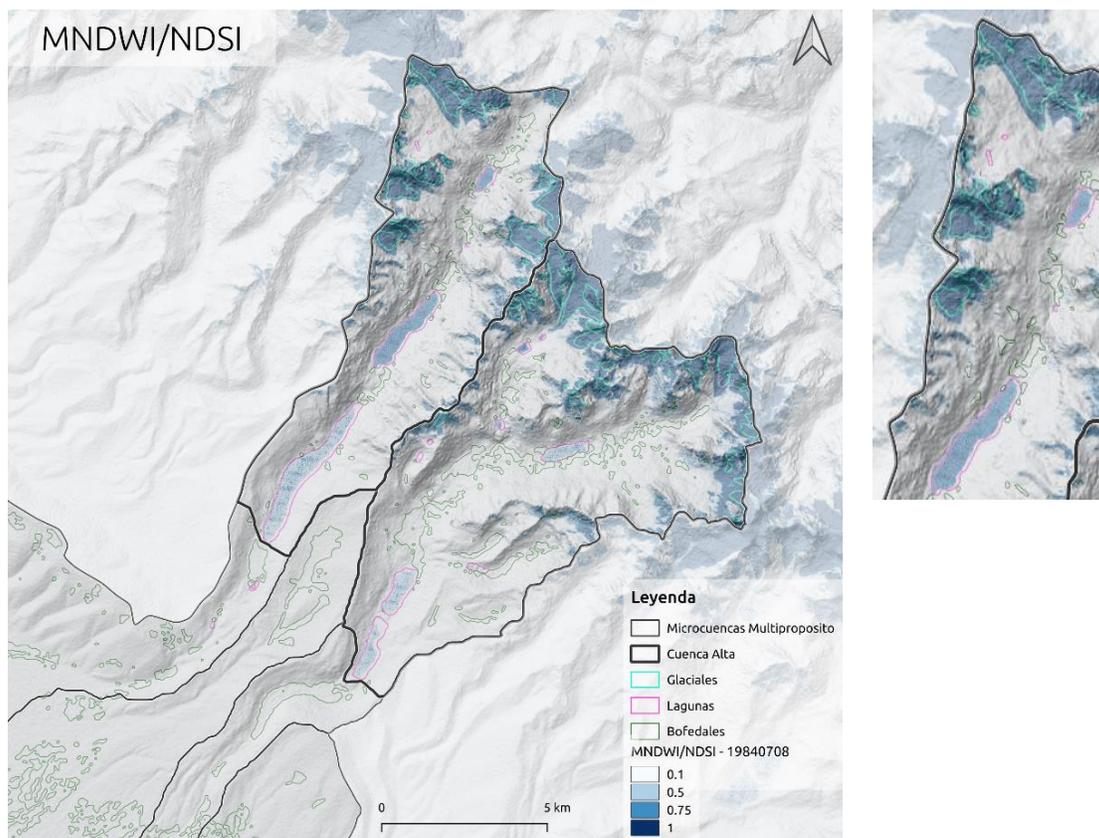


Ilustración 13 Ejemplo del producto MNDWI/NDSI en base de una imagen Landsat 5 para la región del estudio y coincidencia con los límites de lagunas y glaciares actuales (UGCK). Presencia de agua y nieve resulta en valores más cerca de un valor 1

3.2.3 Resumen de índices

Las ecuaciones para cada índice están resumidas en la Tabla 6.

Tabla 6. Resumen de Índices y sus ecuaciones de cálculo

Índice	Ecuación
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
Modified Normalized Difference Water Index	$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$
Normalized Difference Snow Index	$NDSI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$

3.3 Procesamiento de datos Landsat para el estudio

3.3.1 Acceso a datos Landsat y selección de imágenes

La base de datos Landsat es de acceso público y es proveída a través de varias interfaces manejadas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y la NASA. Varias fuentes con la descripción de la base de datos Landsat y las formas de descarga y procesamiento de la información pueden ser encontradas en <http://landsat.usgs.gov/>

Para descargar, revisar y pre-procesar la información LANDSAT se ha hecho uso de un plugin semiautomático disponible en el software QGIS. Este plugin permite buscar en toda la base de datos LANDSAT, las imágenes que corresponden al área de interés, descargar las imágenes seleccionadas y pre-procesar la información de valores de reflectancia de una manera muy eficiente. Un manual bastante completo de este set de herramientas puede encontrarse en:

<http://semiautomaticclassificationmanual-v4.readthedocs.io/en/latest/index.html> y <http://fromgistors.blogspot.com/>

Los satélites Landsat (actualmente Landsat 8) cubren la misma área espacial cada 16 días en promedio. Dependiendo de las condiciones atmosféricas (presencia de nubes, humo, etc.) se pueden generar, en teoría, 26 imágenes por año. Sin embargo, dependiendo del lugar y de las condiciones climatológicas únicamente se generan entre 10 y 15 imágenes al año para la mayoría de los lugares. Adicionalmente, es común que falten datos en la época húmeda por presencia de nubes.

Los datos Landsat están organizados por “huellas” estandarizadas. El área de estudio está en el path/row 001/071 (Ilustración 14).

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

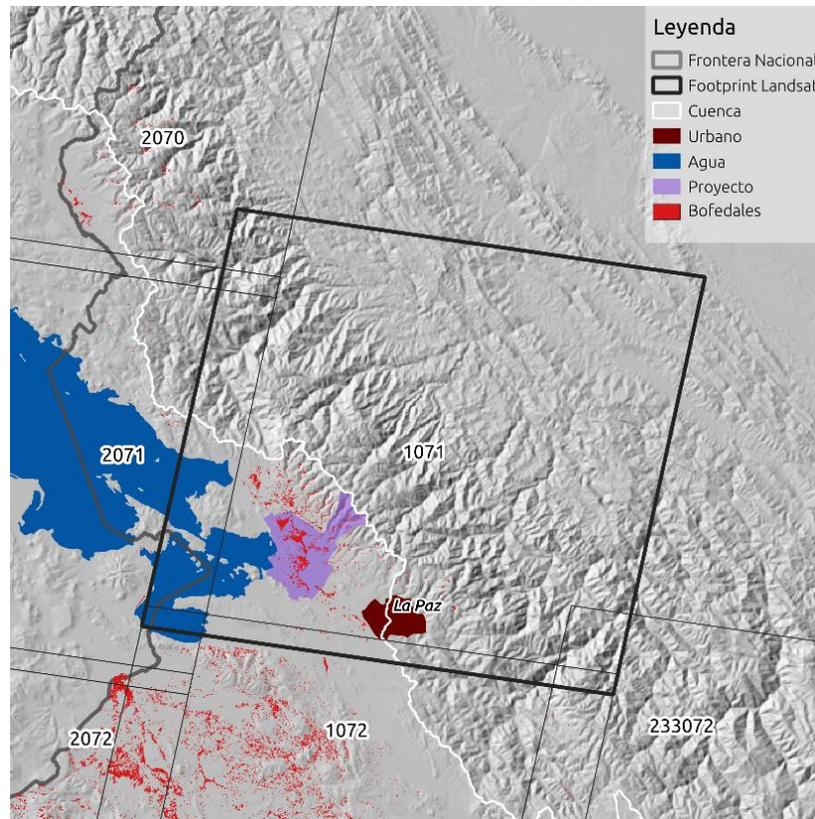


Ilustración 14 área de estudio y "huella" Landsat número 1/071

En la zona del estudio, hemos identificado que en teoría hay 606 imágenes (443 Landsat 5 y 163 Landsat 8). El inventario de datos Landsat (Ilustración 15) muestra todas las fechas con imágenes de la zona del estudio. Apéndice 2 ilustra unos ejemplos de imágenes y el impacto de nubosidad. No hay datos en 2003 porque el sensor Landsat 7 sufrió un error en mayo 2003 y casi ninguna de las imágenes producidas son adecuadas para su uso.

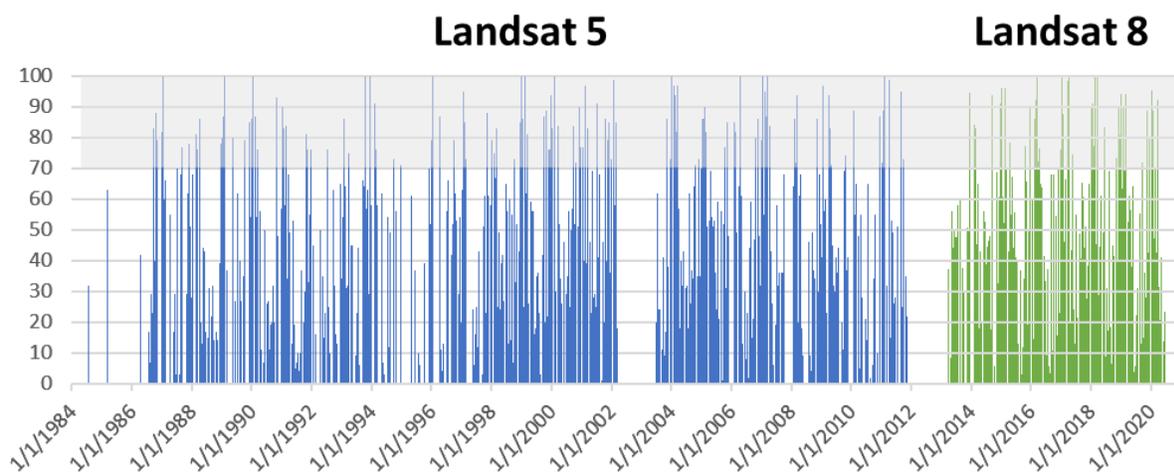


Ilustración 15 Datos Landsat disponibles para el estudio entre 1984 y 2020. Cada línea representa una imagen. El eje vertical indica la nubosidad (en %). La caja gris indica porcentajes de nubosidad mayor a 70%.

Debido a la presencia de nubes y problemas con los sensores episódicos, se ha hecho varios pasos de filtración de las imágenes para eliminar las que no son usables. Un primer paso de filtración resulto en la selección de 200 imágenes Landsat 5 entre 1984 y 2011, y 101 imágenes Landsat 8 entre 2013 y 2020. En un segundo paso de filtración, enfocado en la presencia de nubes específicamente en la zona del estudio, resulto en la selección de 222 imágenes. El tercer paso se detalla a continuación en el párrafo 3.4.

3.3.2 Paso de filtración final

Las series de tiempo NDVI, MNDWI y de áreas glaciares fueron analizadas en Excel y en la herramienta de visualización de datos Tableau. Un paso final de filtración fue filtrar los datos equivocados, es decir los datos que no entran en el rango normal [-1 1] de la señal NDVI o MNDWI, y más concretamente, en el rango aceptable del NDVI para bofedales: [0.1 0.9].

Un NDVI más allá de 0.9 sería un valor NDVI para un bosque tropical denso. Un valor debajo de 0.1 podría ocurrir como ha sido mencionado, si hay nubes en la imagen satelital pero también puede ser que no hay vegetación y que es el resultado de una mala clasificación de la unidad de bofedal. En particular, si la pendiente de la unidad de bofedal es muy fuerte o si el área es muy pequeña es probable que haya un error de clasificación en la capa SIG.

Se hizo una filtración final de las imágenes de mala calidad con los criterios siguientes:

- El 75% de los bofedales tienen un valor NDVI en el rango [0.1 0.9] (Ilustración 16)

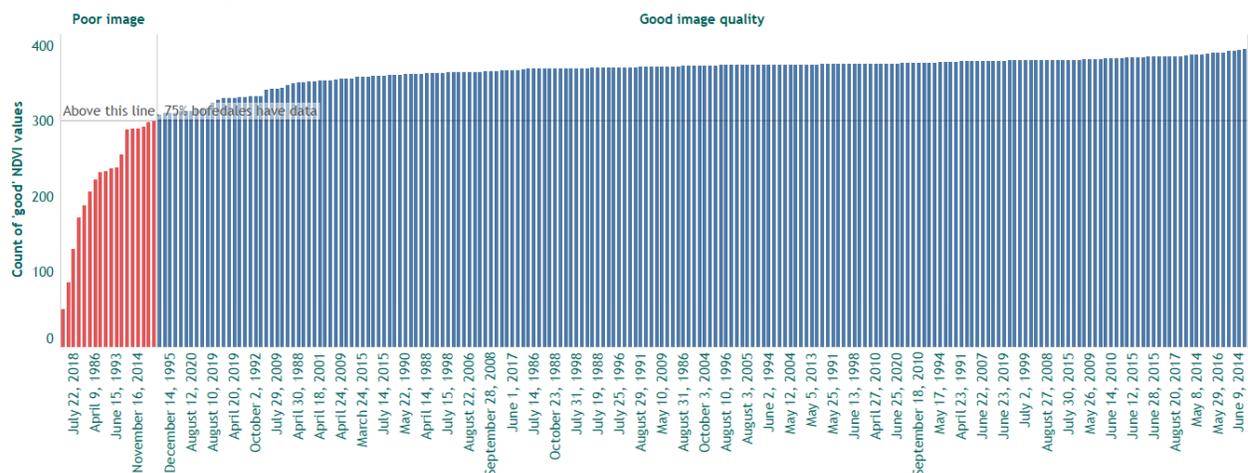


Ilustración 16. Numero de bofedales con datos NDVI aceptables en cada fecha

En cuanto a las unidades de bofedal, la filtración fue basada en los criterios:

- El área de la unidad es mas de 2000m²,
- La pendiente promedio de la unidad es menos de 25%
- La unidad tiene un valor NDVI 'correcto' el 50% del tiempo, es decir en el 50% de las imágenes son de buena calidad.

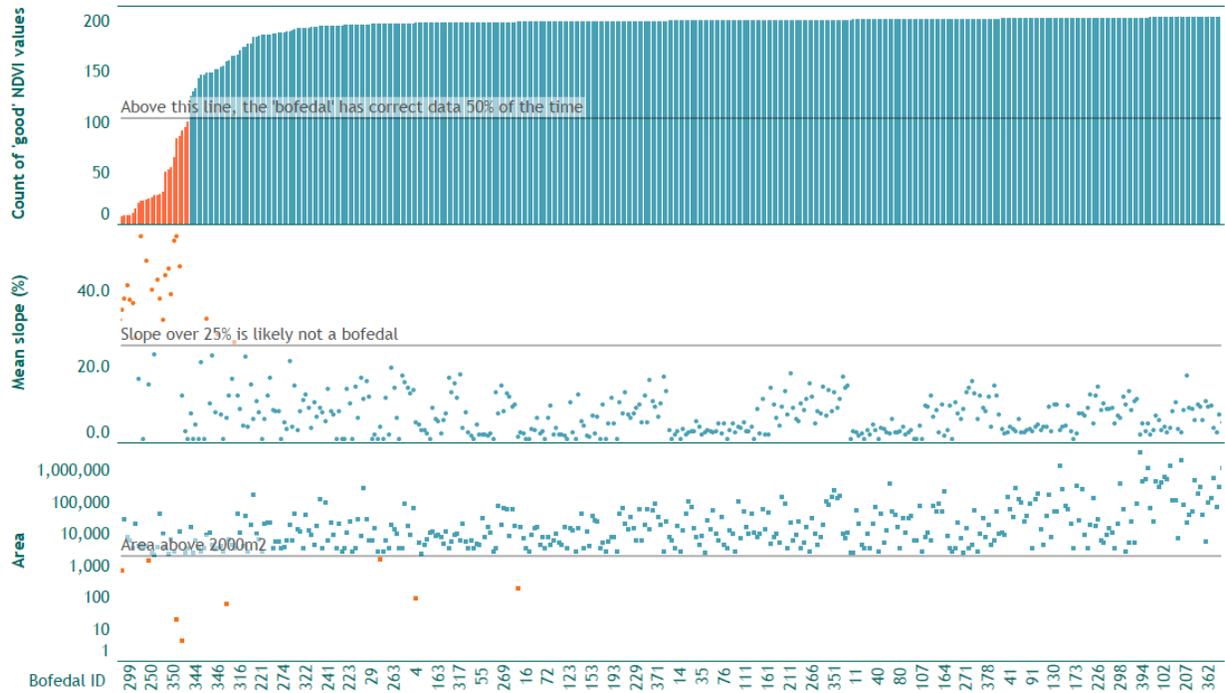


Ilustración 17. Numero de fechas en las que una unidad de bofedal tiene datos aceptables, junto al área y la pendiente del bofedal

Como se puede notar en la Ilustración 17, en la mayoría de los casos las unidades que no tienen datos NDVI aceptables son unidades con pendientes fuertes. Esto confirma la hipótesis del error de clasificación.

El último paso de filtración, resulto en la eliminación de 18 imágenes (de 222 fechas) y de 26 unidades de bofedales (del total de 402).

3.4 Análisis de vegetación y agua de Bofedales

Fueron analizadas las repuestas espectrales de los bofedales en el tiempo y el espacio. Primero se hizo un análisis de la variaciones temporales y climáticas y luego de las variaciones según la topografía y el tipo de bofedal.

3.4.1 Variaciones temporales del NDVI

Se observa una tendencia cíclica de los valores NDVI mensuales promedios al nivel de la región de estudio. Abajo en verde, son los promedios con Landsat 8 y en azul con Landsat 5. Cada línea representa un bofedal distinto. (Ilustración 18)

La tendencia general indica que los valores NDVI son más altos entre enero y abril, luego bajan entre mayo y septiembre y empiezan a subir de nuevo octubre hasta el fin del año. Como el NDVI es un índice de vegetación, un valor más alto indica una vegetación más densa y verde, mientras que los valores más bajos indican una vegetación más escasa o menos verde.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

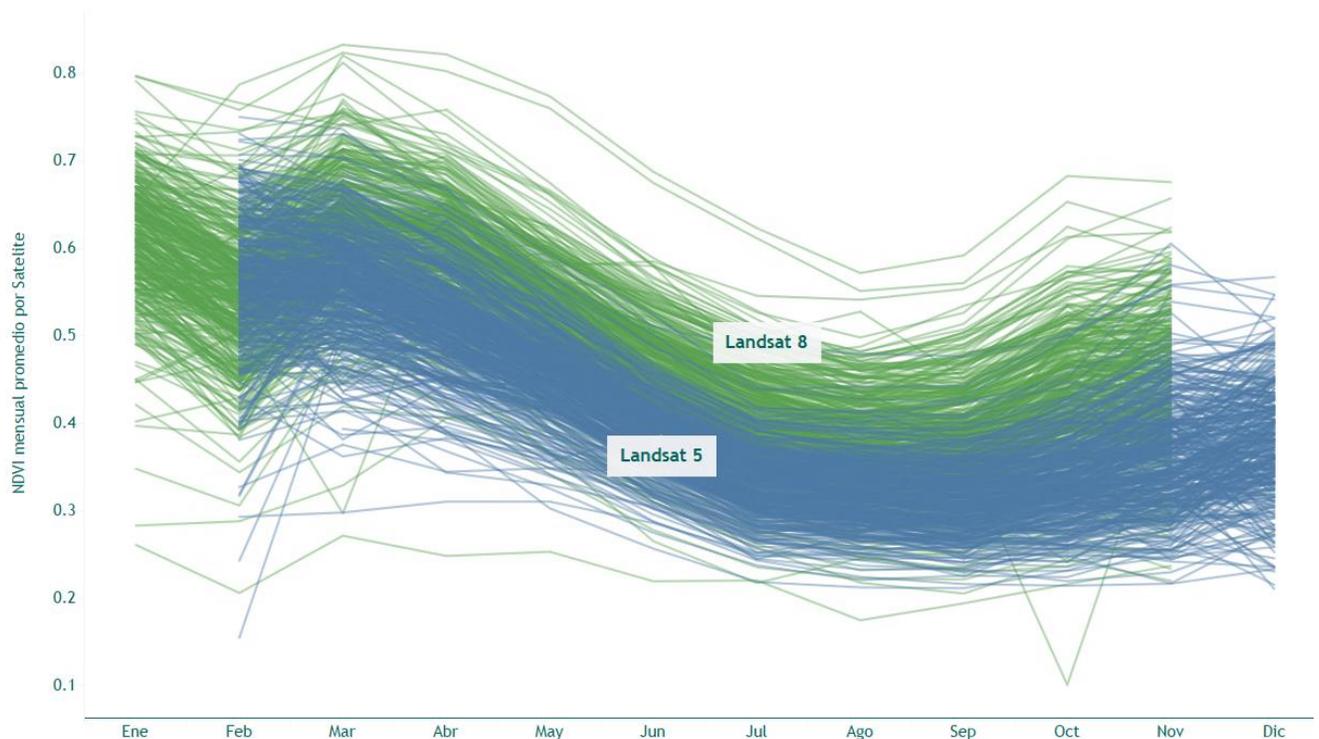


Ilustración 18. Variaciones mensuales del NDVI para cada bofedal, por satélite

Desafortunadamente, se aprecia una diferencia entre los dos satélites Landsat 5 y Landsat 8 debido a los distintos sensores. Parece que Landsat 8 es más sensible a las radiaciones rojas y entonces mide una señal más intensa. Por esta razón, no es posible comparar cambios anuales para la serie de tiempo completa sino solamente de 1986 a 2011 por un lado, y por otro lado de 2013 a 2020.

También podemos notar que no contamos con datos Landsat 5 en el mes de enero y tampoco contamos datos Landsat 8 en diciembre. En realidad, por la presencia de nubes, la mayoría de las imágenes disponibles corresponden a días en la época seca. La Tabla 7 muestra la distribución de las 204 imágenes seleccionadas para el análisis.

Tabla 7. Total de imágenes por satélite

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Landsat 5	0	1	2	9	26	22	31	25	11	6	3	3	139
Landsat 8	1	1	2	5	9	14	13	11	5	2	2	0	65

3.4.2 Variaciones temporales del NDVI con el clima

A pesar de la falta de datos en la época húmeda, podemos comparar las tendencias de los promedios NDVI mensuales con factores climáticos y proponer la hipótesis siguiente: Existe una relación entre las variaciones temporales del NDVI y los niveles de precipitación.

Usamos los datos de precipitación y temperatura GMET (estación BO2021) a paso de tiempo diario al nivel de la cuenca, entre 1980 y 2015 y comparamos estos datos con el NDVI en el periodo 1986-2015.

Promedios mensuales NDVI por satélite
Promedios mensuales climáticos para la cuenca Katari

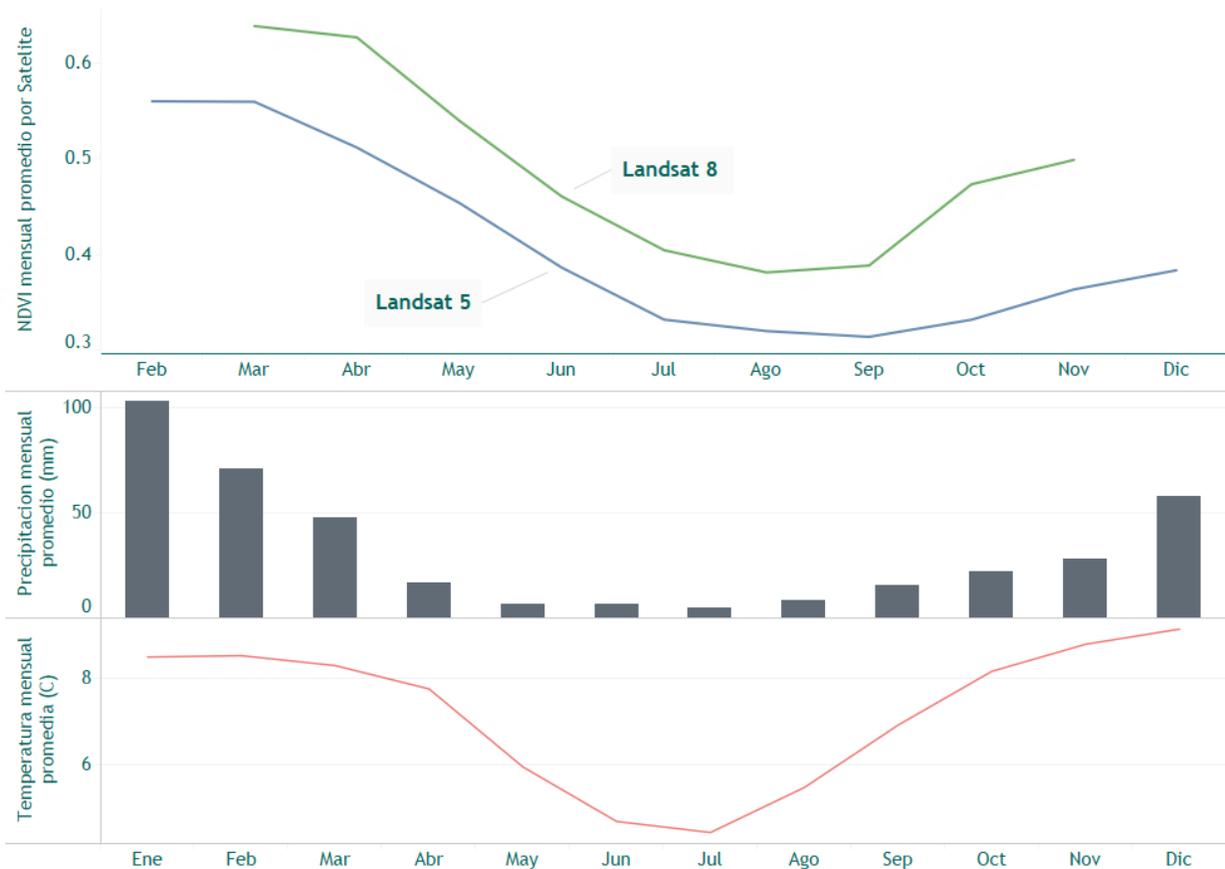


Ilustración 19. Variación NDVI mensuales y datos climáticos (1986-2015)

En términos de correlación entre los promedios NDVI y de datos de precipitación mensuales en el periodo 1986-2015, el R^2 es de 0.36 y 0.43 para Landsat 5 y Landsat 8 respectivamente (Ilustración 20). Pero se recomienda investigar esta correlación con más datos. A futuro, sería interesante validar en terreno estas observaciones del monitoreo remoto.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

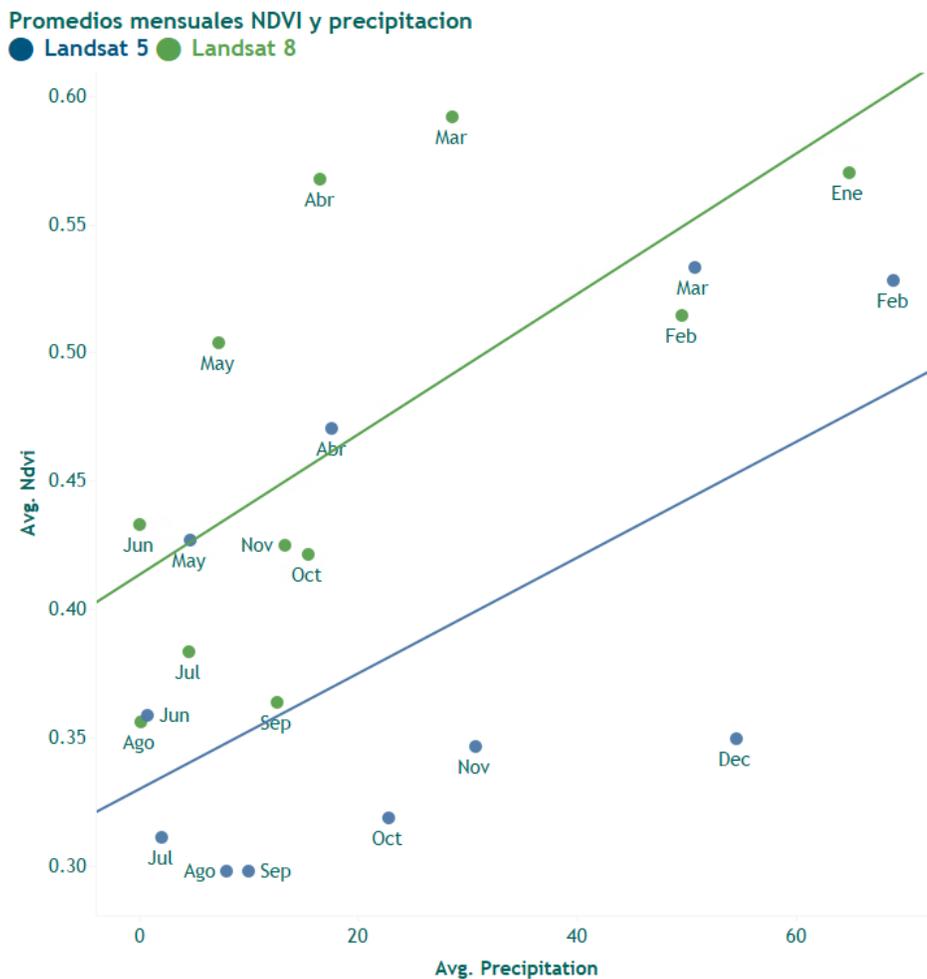


Ilustración 20. Correlación entre promedios mensuales NDVI y precipitación

La Ilustración 21 propone una representación conceptualizada de las variaciones mensuales del NDVI que traduce las observaciones detalladas arriba en niveles posibles de ‘verde’ de los bofedales. La ilustración es parte de una serie de planillas de visualización de datos desarrolladas en la herramienta Tableau para comunicar sobre el proyecto (Apéndice 4).

Las planillas están accesibles en línea con el vínculo:

<https://public.tableau.com/profile/jeanne.fernandez#!/vizhome/BofedalesAltoandinos/Introduccion>

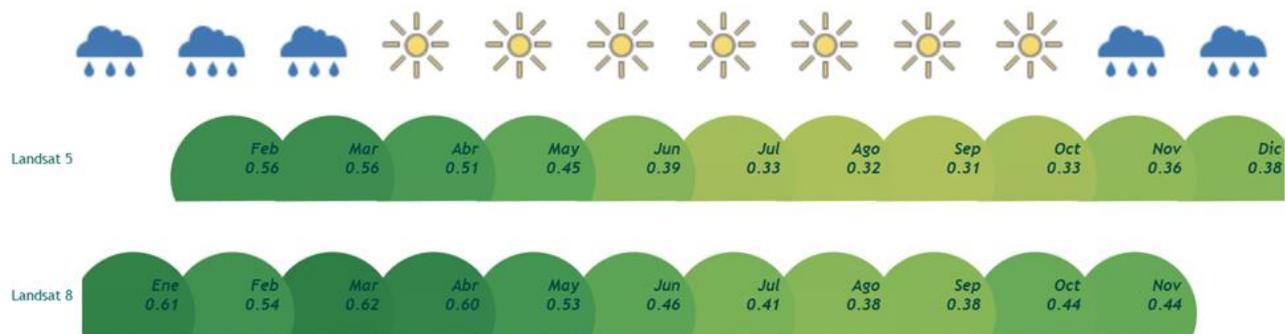


Ilustración 21. Representación conceptual del color mensual de los bofedales altoandinos en la cuenca Katari

3.4.3 Variaciones temporales de MNDWI

Análisis de todas las observaciones de MNDWI indica que la variabilidad estacional no es muy grande y que se concentra en las áreas a rededor de cuerpos de agua establecidos y parece, como puede ser esperada, limitada por la topografía local. Solo en unos momentos distintas y en un pequeño número de bofedales se observó una saturación con agua superficial corto, en particular durante la época húmeda, entre diciembre y febrero. Como hay una falta de observaciones generales (por nubosidad) en esta época es difícil establecer el exento de este proceso durante estos meses.

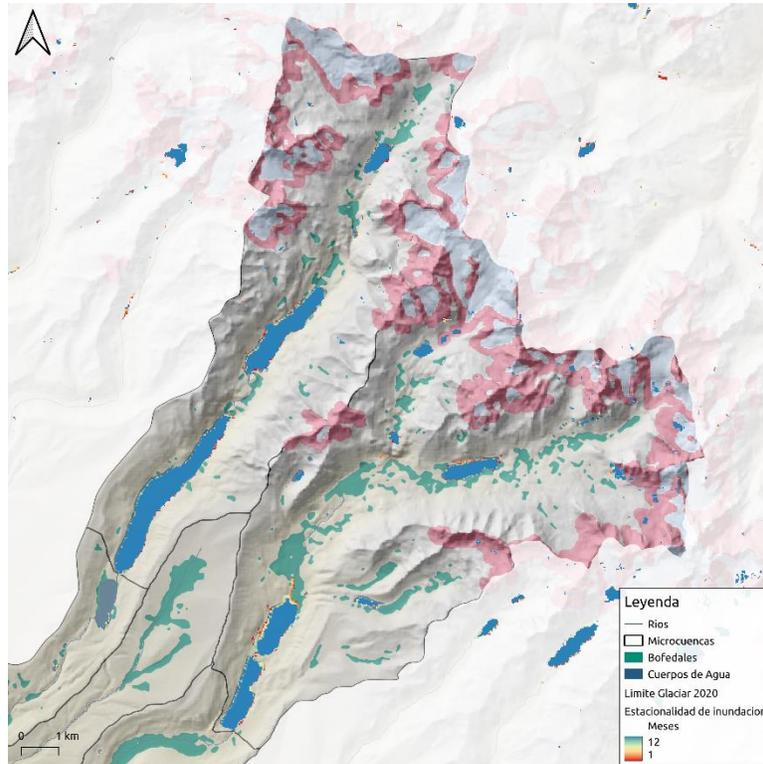


Ilustración 22 Variabilidad estacional del MNDWI

3.4.4 Variaciones temporales del NDVI y del MNDWI

En contraste con el NDVI, el índice MNDWI presenta variaciones temporales, pero no son tan marcadas. El índice MNDWI es negativo todo el tiempo lo cual muestra que no hay agua en las unidades de bofedal.

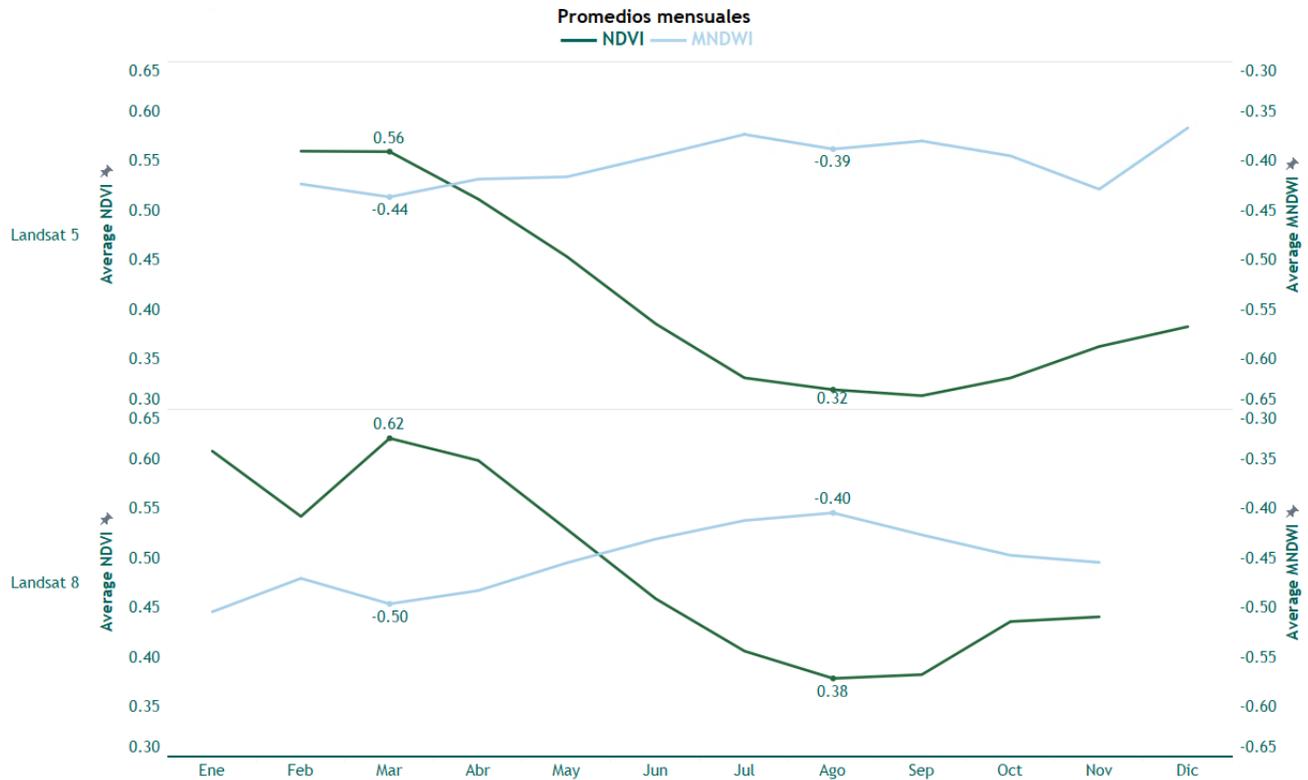


Ilustración 23. Variaciones mensuales promedio del NDVI y MNDWI

La correlación entre los valores MNDWI y NDVI (promedios de todos los bofedales, fecha por fecha) es lógica dado que son datos de radiación detectados por un mismo sensor en zonas distintas del espectro electromagnético. Cuando la vegetación es más verde, refleja radiación en la parte 'roja' del espectro, resultando en un NDVI más alto y un MNDWI más bajo.

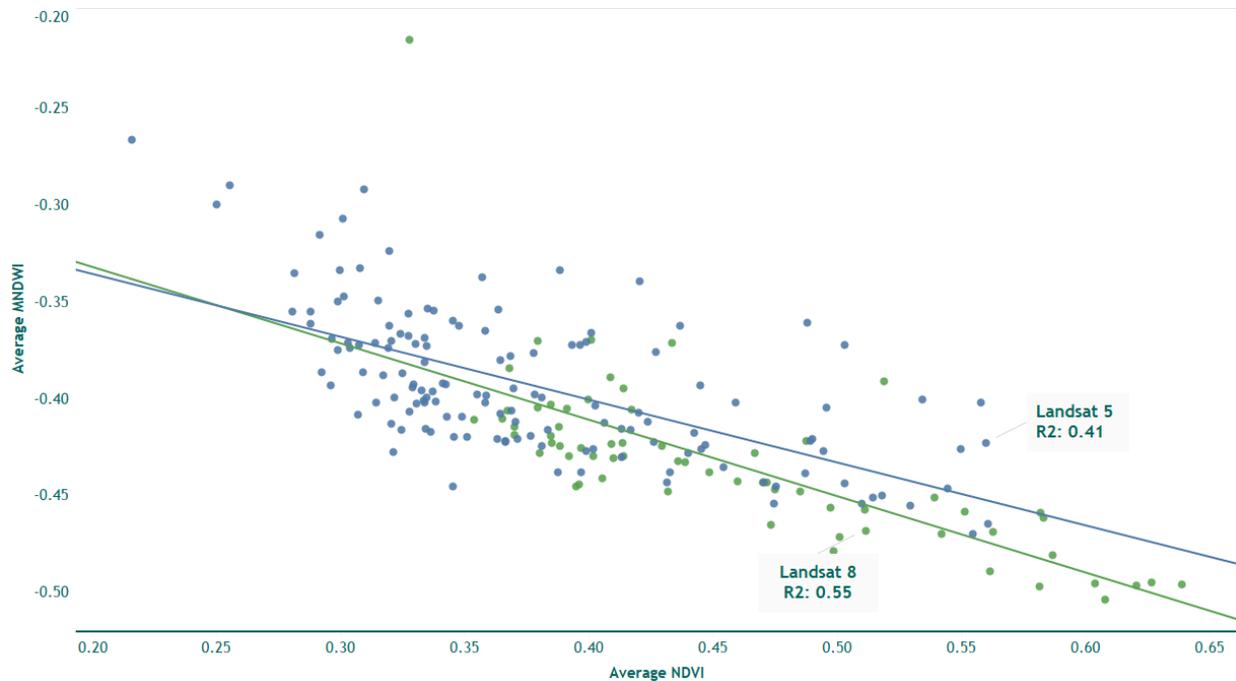


Ilustración 24. Correlación entre NDVI y MDWI

3.4.5 Clasificación de los bofedales con datos topográficos

Para analizar el comportamiento de los bofedales en función de la altura se hizo una clasificación en 3 grupos. Agrupamos los bofedales según la altura a la cual se encuentran ubicados, en base al análisis topográfico descrito en la Sección 2:

- Menos de 4200m
- Entre 4200 y 4600m
- Mas de 4600m

También agrupamos los bofedales según la pendiente:

- Más de 10%
- Menos de 10%

La Ilustración 25 muestra los grupos de bofedales por altura. La Ilustración 26 muestra las variaciones del NDVI para cada uno de estos grupos (color de la línea azul, verde o amarillo), en promedios según el mes con datos Landsat 5. También comparamos las diferencias entre los valores NDVI en función de la pendiente (grosor de la línea).

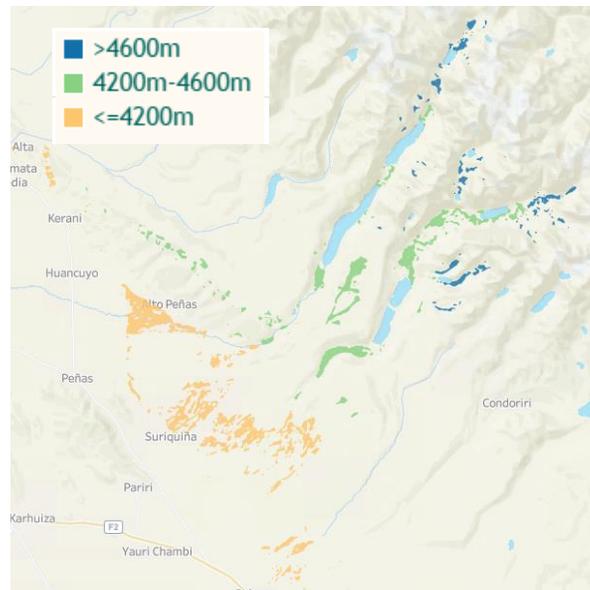


Ilustración 25. clasificación de los bofedales según altura

Series de tiempo NDVI y MNDWI

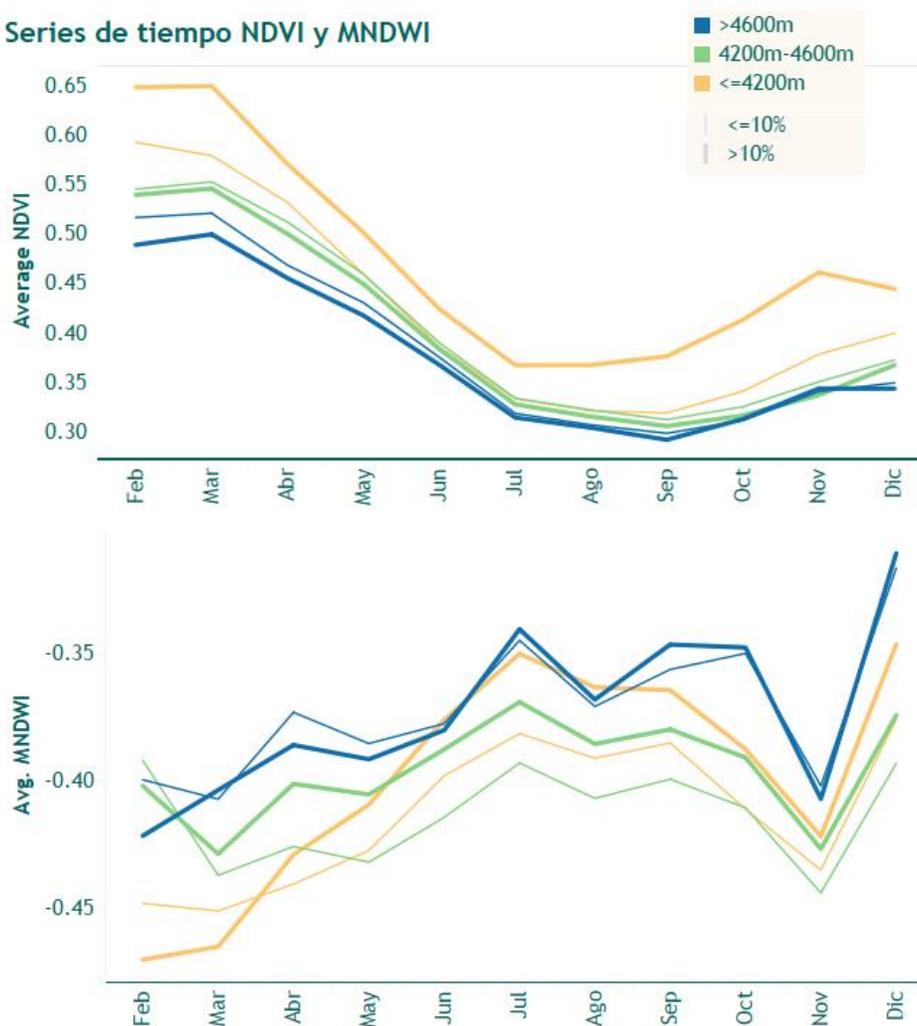


Ilustración 26. Series mensuales NDVI (arriba) y MNDWI (abajo) por altura y pendiente, Landsat 5

Las diferencias en función de la altura se observan en particular entre fines de diciembre y junio. Los bofedales en las zonas más bajas (debajo de los 4200m) se encuentran más verdes. En las zonas más altas (por encima de 4600m) los bofedales pueden estar cubiertos de nieve y por esta razón el NDVI promedio es un poco más bajo. En cuanto a la pendiente, parece que el NDVI es más bajo con una pendiente más fuerte. Se encuentra una excepción debajo de los 4200m, donde la pendiente parece tener el efecto contrario.

Podemos concluir de la Ilustración 26 que la señal NDVI de los bofedales altoandinos presenta un patrón estacional característico de los humedales "siempre verdes". Durante la estación seca/fría (mayo a octubre), los bofedales son claramente menos verdes que durante la estación húmeda/cálida (noviembre a abril). La diferencia en el NDVI promedio entre las partes bajas y altas de las cuencas hidrográficas se puede explicar ya que las temperaturas son más altas debajo de los 4200m. Entonces la vegetación es más productiva y abundante que en las elevaciones más altas.

En cuanto al MNDWI, este índice de agua muestra cierta variabilidad, en gran parte debido a las nevadas al final de la estación seca y al derretimiento de la nieve y a la lluvia antes de que la vegetación empiece a reverdecer en enero. Los bofedales ubicados a elevaciones más bajas muestran una mayor variación del MNDWI, posiblemente debido a una mayor área de captación aguas arriba y un pulso de inundación/sequia más intenso. Se tiene que notar que debido a la escala del eje Y, los cambios del MNDWI parecen mucho más marcados en la Ilustración 26.

3.4.6 Variaciones del NDVI por tipo de vegetación

Dentro el marco de este proyecto no ha sido posible realizar una expedición de campo en Bolivia para poder observar los bofedales de cerca. Pero gracias al trabajo anterior de la investigadora Rosa Isela Meneses hemos podido aprender sobre los distintos tipos de bofedales y conseguir fotos de la región y de las especies dominantes. Se han usado los informes sobre el estado de conservación de los bofedales (Meneses, 2012 y 2013) realizados para el BID. Con estos informes, hemos podido vincular algunos bofedales y sus especies con señales NDVI.

La Ilustración 27 muestra la ubicación de los bofedales en los informes de R.I. Meneses (2012, 2013).

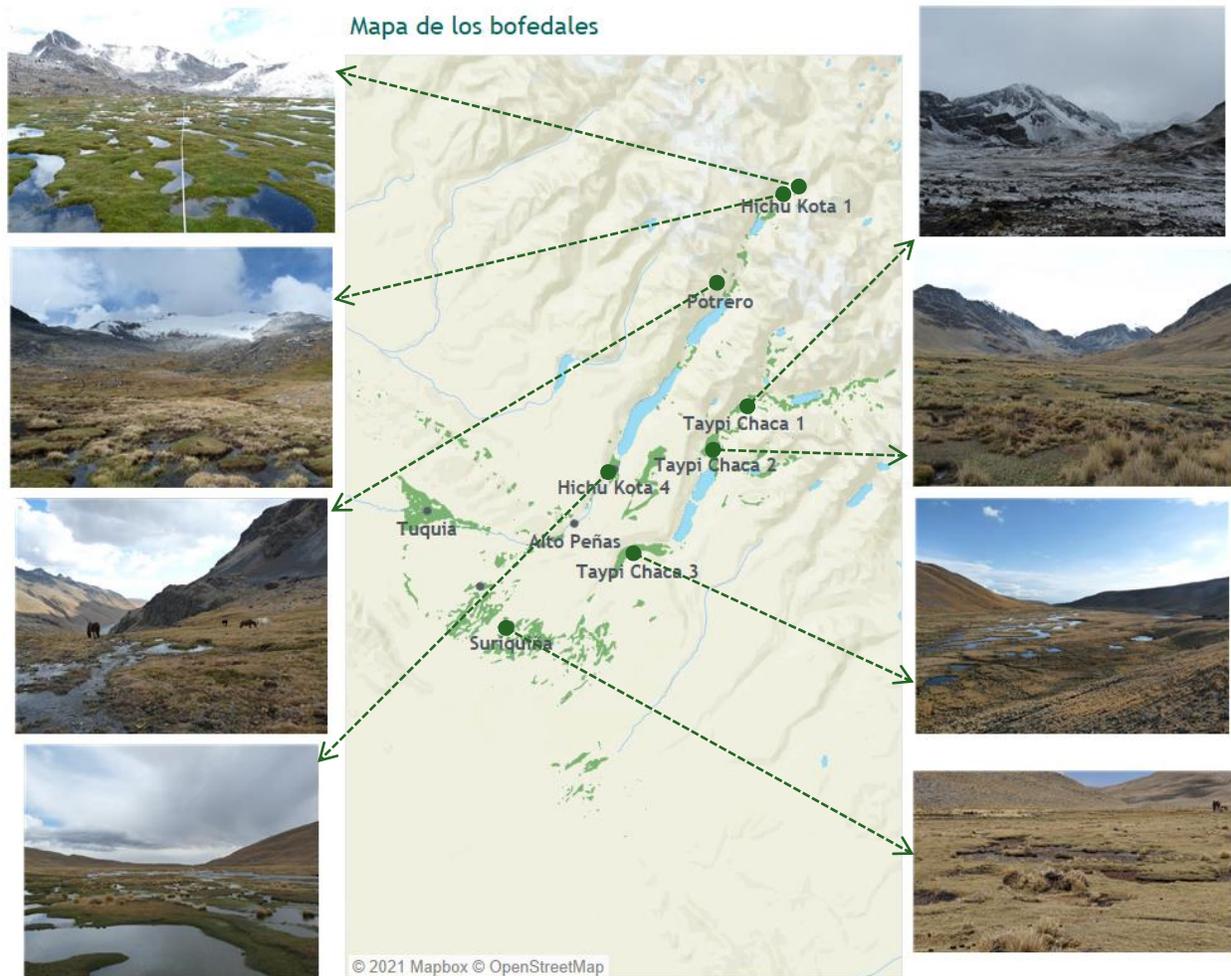


Ilustración 27. Bofedales identificados en informes sobre el estado de conservación de los bofedales altoandinos

La Tabla 8 y la Tabla 9 presentan las características principales de estos bofedales basado en los informes de Rosa Isela Meneses. La mayoría de estos bofedales son usados para ganadería (camélidos, vacuno, ovino) y pastoreo. El bofedal Taypi Chaca 3 esta usado también para extracción de turba. El sobrepastoreo y la fragmentación por ojos de agua y canales causa una vulnerabilidad importante de los ecosistemas.

Tabla 8. Características de algunos bofedales de la subcuenca Hichu Khota y subcuencas aguas abajo

Nombre	Elevación	Estado	Vegetación	Fotos de la vegetación	Características
Hichu Khota 1	5020	Muy bueno	Distichia filamentosa, Distichia muscoides	 	Se caracteriza por poseer mucha agua. Vulnerabilidad alta por la poca profundidad de los cojines susceptibles a la erosión y al pisoteo de caballos.
Hichu Khota 2	4850	Bueno – Regular	Distichia muscoides, Oxychloe andina	 	Vulnerabilidad asociada con sobrepastoreo y pisoteo.
Potrero	4740	Regular	Distichia muscoides, Oxychloe andina	 	Sobrepastoreo y pisoteo por caballos. Alta proporción de plantas muertas producto del desecamiento del bofedal.
Hichu Khota 4	4350	Bueno	Plantago tubulosa, Phylloscirpus deserticola	 	Bofedal con una alta proporción de agua, altamente fragmentado por ojos de agua y canales.
Alto Peñas	4220	Bueno – Regular	Plantago tubulosa, Phylloscirpus deserticola	 	Vulnerabilidad alta por la presencia de ganado vacuno.
Tuquia	4026	Regular	Plantago tubulosa, Lachemilla diplophylla	 	Vulnerabilidad alta debido a la dependencia de la vegetación por el agua.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

Tabla 9. Características de algunos bofedales de la subcuenca Taypi Chaca y subcuencas aguas abajo

Nombre	Elevación	Estado	Vegetación	Fotos de la vegetación	Características
Taypi Chaca 1	4493	Regular-Malo	Phylloscirpus deserticola, Oxycloe andina	  <p><i>Phylloscirpus deserticola</i> <i>Oxycloe andina</i></p>	Las comunidades vegetales están fragmentadas y se necesita un manejo adecuado de los cursos de agua. Bofedal altamente intervenido y con una gran proporción seca.
Taypi Chaca 2	4479	Regular-Malo	Phylloscirpus deserticola, Plantago tubulosa	  <p><i>Phylloscirpus deserticola</i> <i>Plantago tubulosa</i></p>	Sobrepastoreo. Las comunidades vegetales están fragmentadas y se necesita un manejo adecuado de los cursos de agua. Existen algunos canales artificiales para el manejo del bofedal.
Taypi Chaca 3	4429	Malo	Plantago tubulosa, Phylloscirpus deserticola	  <p><i>Plantago tubulosa</i> <i>Phylloscirpus deserticola</i></p>	Vulnerabilidad muy alta por sobrepastoreo y extracción de turba. Bofedal altamente intervenido y seco. Presencia de canales para riego del bofedal y para extraer agua.
Suriquiña	4155	Bueno – Regular	Plantago tubulosa, Cotula mexicana	  <p><i>Festuca dolichophylla</i> <i>Plantago tubulosa</i></p>	Sobrepastoreo y a la alta dependencia por el riego
Suriquiña medio	4127	Bueno – Regular	Festuca dolichophylla, Plantago tubulosa	  <p><i>Plantago tubulosa</i> <i>Cotula mexicana</i></p>	Vulnerabilidad alta asociada con la pequeña área que cubre el bofedal.

Según la literatura, es posible comparar diferentes clases de humedales usando datos NDVI. Hüttig et al (2011) establece que la variabilidad temporal de los valores de NDVI derivados de datos Landsat 5 TM muestra diferentes patrones que varían con las estaciones. El estudio de Li et al (2015) basado en un set de índices derivados con el satélite MODIS obtuvo resultados similares sobre la variabilidad de las respuestas espectrales de grupos de humedales.

Se notan diferencias entre las señales NDVI para cada bofedal (Ilustración 28). Por lo tanto, por la poca cantidad de datos es difícil saber si la vegetación podría explicar estas diferencias. También podría ser relacionada con altura, pendiente o estado de conservación.

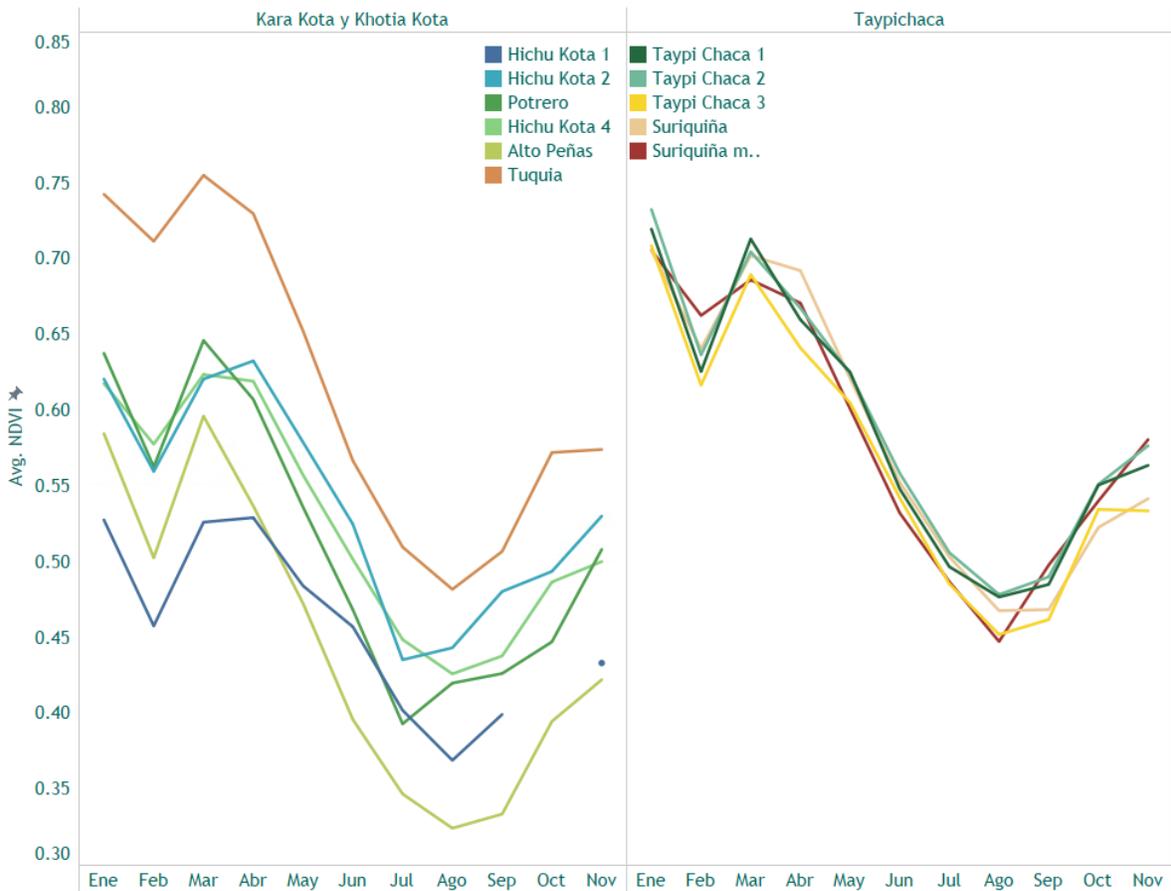


Ilustración 28. NDVI promedio para los bofedales identificados en los estudios de conservación

3.5 Análisis de Nieve

Para el análisis de nieve y del área glaciar utilizamos el índice de Nieve (NDSI – sección 3.2.2).

Para diferenciar la nieve estacional y el límite glaciar anual se puede usar la extensión mínima estacional. La conciencia es muy alta entre el límite de los glaciares según este método (línea roja) y la capa SIG de glaciares en la base de datos FUNDPCO/UGCK (línea amarilla) (Ilustración 29).

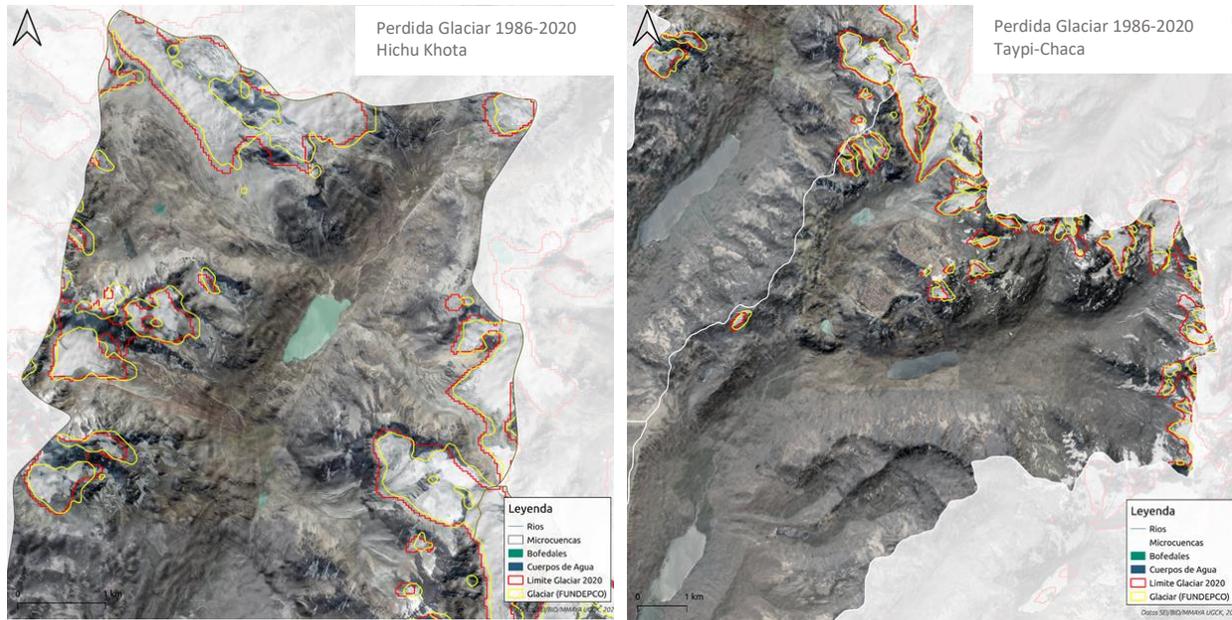


Ilustración 29 Limite Glaciar en base del método NDSI y la clasificación actual de UGCK

3.5.1 Área de los glaciares al nivel regional

El análisis del área de los glaciares de la Cordillera Real basado en el índice de Nieve (NDSI) muestra que hay una tendencia negativa fuerte de la cobertura de nieve a nivel regional (Ilustración 30). La Ilustración 31 indica, en azul, las áreas glaciares perdidas entre 1986 y 2020. Usando los mínimos de los NDSI anuales como proxy para la extensión glaciár (Ilustración 32) vemos que se ha perdido aproximadamente el 43% del área glaciár en este periodo. Extrapolando esta tendencia lineal, es probable que se pierden todos los glaciares antes de 2078. En realidad, anticipamos que este proceso pueda ser aún más rápido porque el proceso de retroceso se vuelve cada vez más rápido con menos masa glaciár.

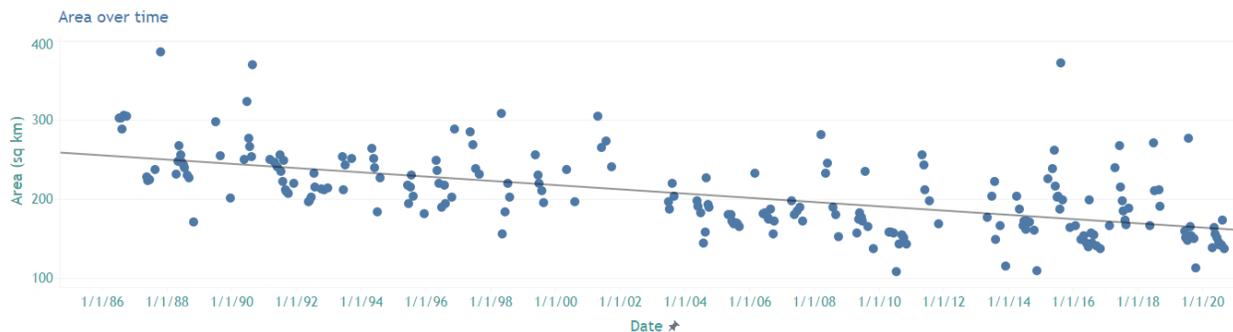


Ilustración 30. Evolución del área nieve entre 1986 y 2020 en la zona de estudio, en base a datos NDSI

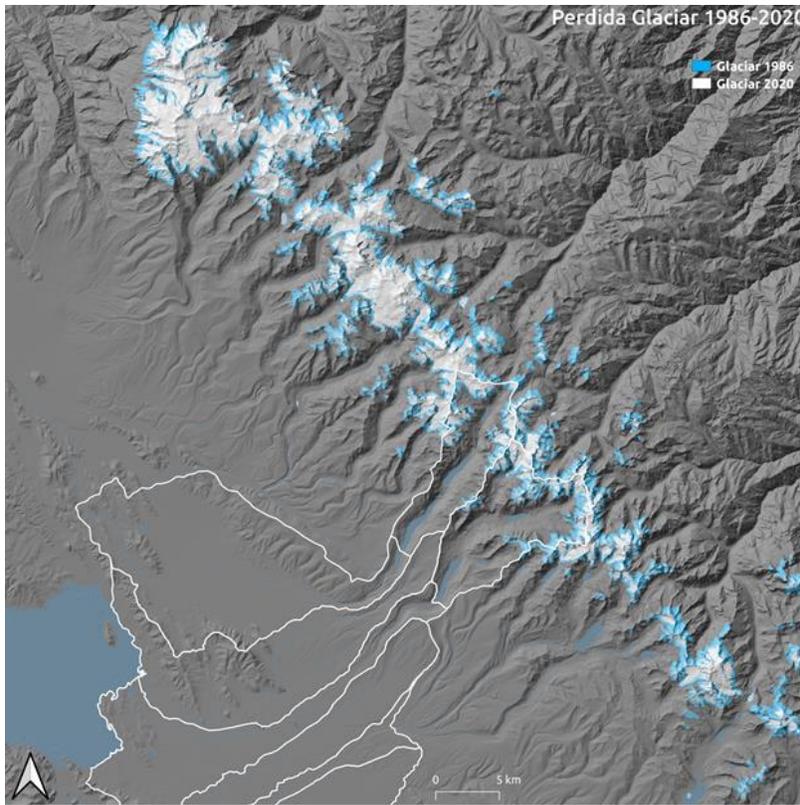


Ilustración 31 Área glaciar estimada en la Cordillera Real en 1986 y 2020

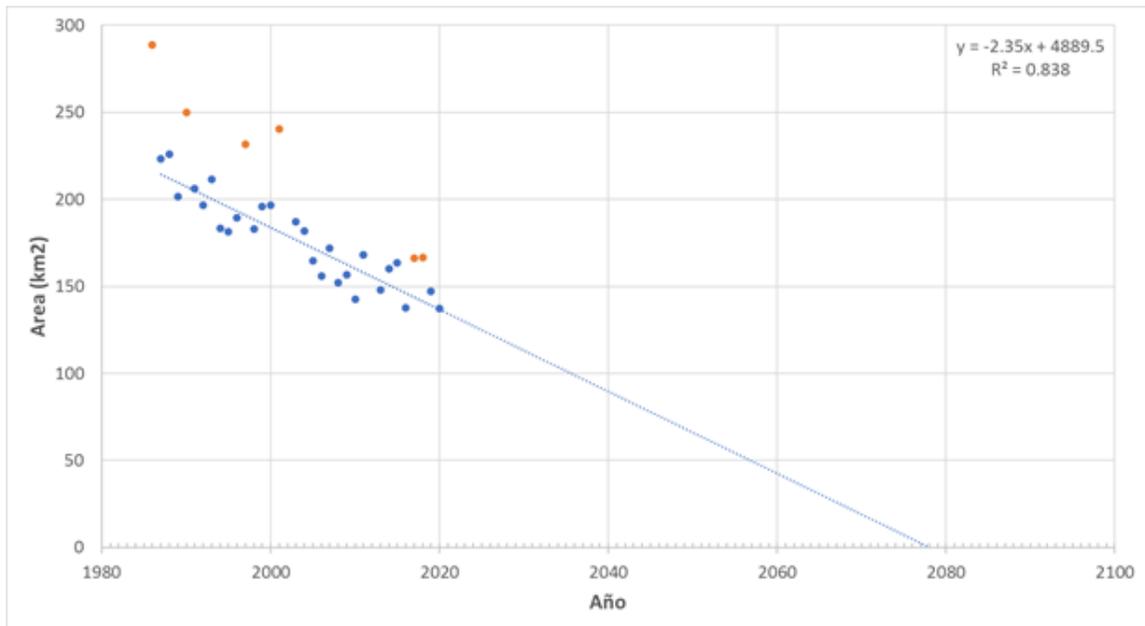


Ilustración 32 Área glaciar entre 1986 y 2020, y extrapolación lineal hasta 2078

Estos resultados coinciden con análisis previos destacando cómo los Andes están experimentando los efectos obvios del cambio climático, incluyendo el aumento de las temperaturas, la disminución de la capa de nieve, y tasas de retroceso glacial aceleradas. (Verbist et al. 2018). En Bolivia, Rabatel et al. (2006) encontró que en el Cerro Charquini, el retroceso glacial fue multiplicado por 4 entre 1983 y 1997. Basado en la pérdida promedio de área glacial entre 1976 y 2010 en los Andes Tropicales, Rabatel et al. (2013) concluyeron que los glaciares más pequeños por debajo de 5400 m podrían derretirse completamente en el siglo XXI.

El cambio climático y el retroceso de los glaciares afectarán la disponibilidad futura de agua en los Andes tanto en términos de magnitud de flujo de escorrentía como de variabilidad estacional (Verbist et al. 2018). Baraer et al. (2012) vinculo la una disminución de las descargas anuales en la cuenca alta del Río Santa en Perú con el retroceso de los glaciares en la Cordillera Blanca peruana.

3.5.2 Área de los glaciares al nivel local

En las áreas de estudio (Ilustración 33), se puede observar una tendencia de pérdida de área glacial similar las observaciones regionales. Ambos glaciares – Hichu Khota (abasteciendo Khara Khota, aguas abajo) y Taypi Chaca - presentan una tasa de pérdida anual de 0.16 km² y han perdido más del 50% de su área en el periodo 1986 a 2020. Extrapolando esta tendencia es posible que desaparezcan los glaciares en las cuencas Hichu Khota y Taypi Chaca antes de 2050 y probablemente entre 2030 y 2040.

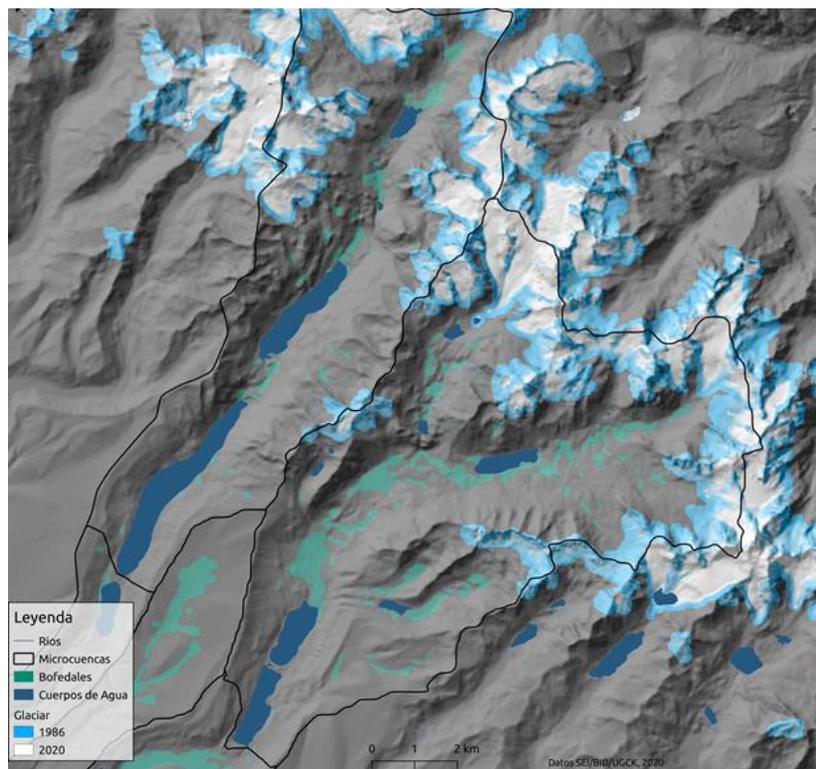


Ilustración 33 Área glacial estimada en las cuencas Hichu Khota y Taypi Chaca en 1986 y 2020

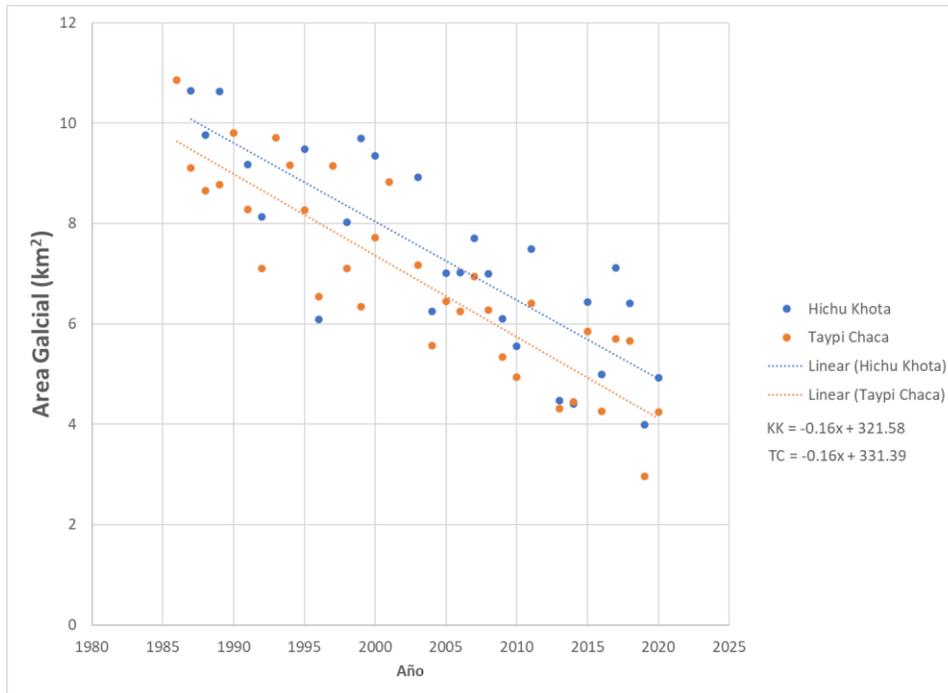


Ilustración 34 Área glaciar entre 1986 y 2020, para las cuencas Hichu Khota y Taypi Chaca, y extrapolación lineal hasta 2052

3.5.3 Indicadores de cambio climático

Revisando el promedio del NDVI de los bofedales altoandinos en el periodo entre 1986 y 2020 observamos una tendencia positiva (Ilustración 35). Aunque se debería investigar esta tendencia con más detalle, puede que sea relacionada con el cambio climático: se puede notar el pequeño incremento de las temperaturas máximas en la Ilustración 36 y el incremento de los niveles de precipitación en la región entre 1986 y 2020 (Ilustración 37).

Nuestra hipótesis es que la nieve de los glaciares se está derritiendo y esta agua estará recargando los acuíferos que abastecen los bofedales. Los bofedales todavía están recibiendo suficiente agua, pero en el futuro podrían ser afectados si la recarga se reduce.

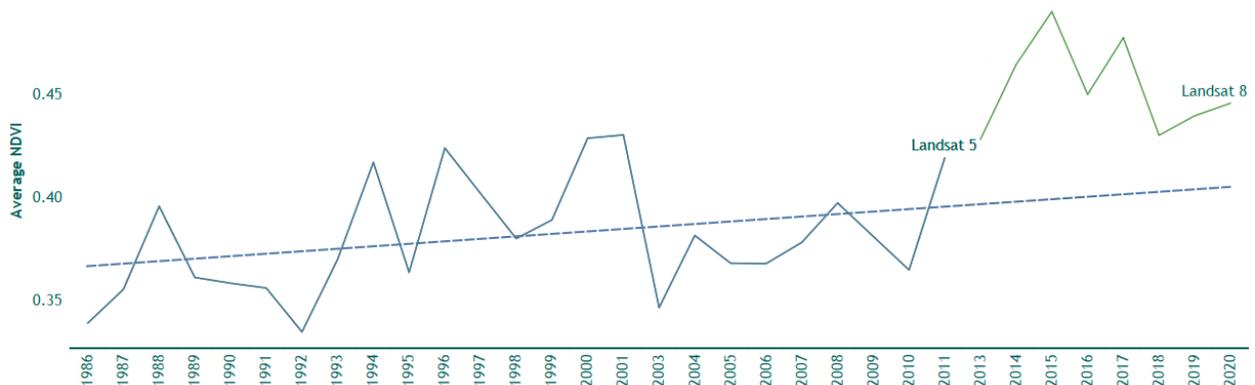


Ilustración 35. Promedios NDVI anuales por satélite

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

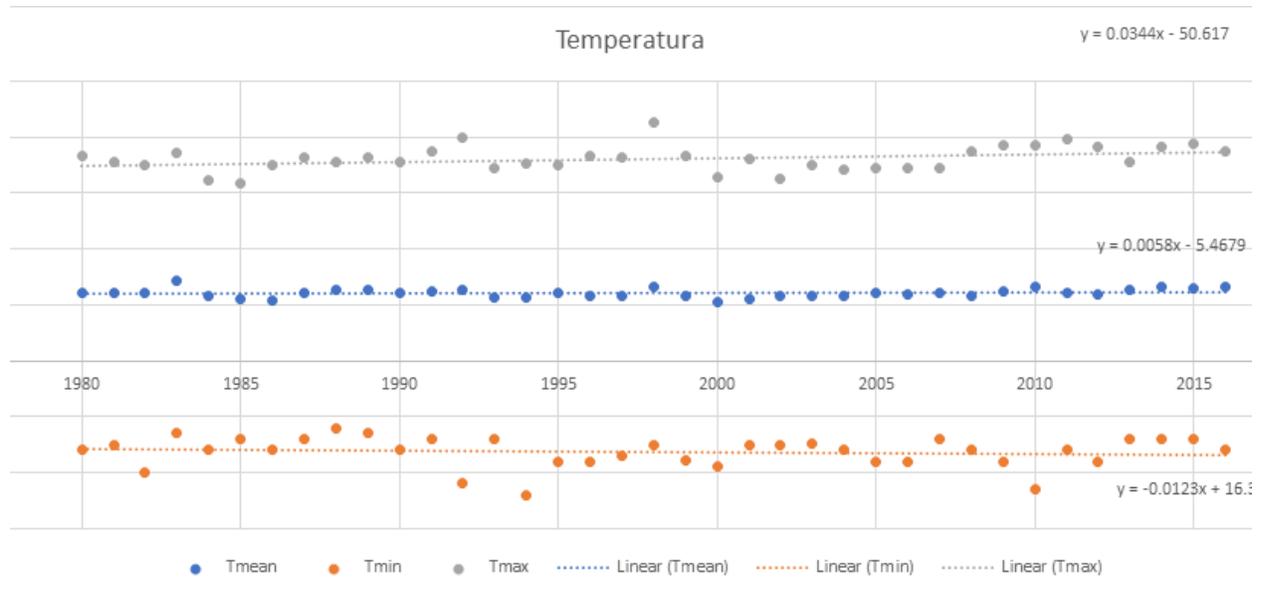


Ilustración 36 Serie de tiempo de temperatura máxima, mínima y promedio entre 1980 y 2015 en base de estación BO2021

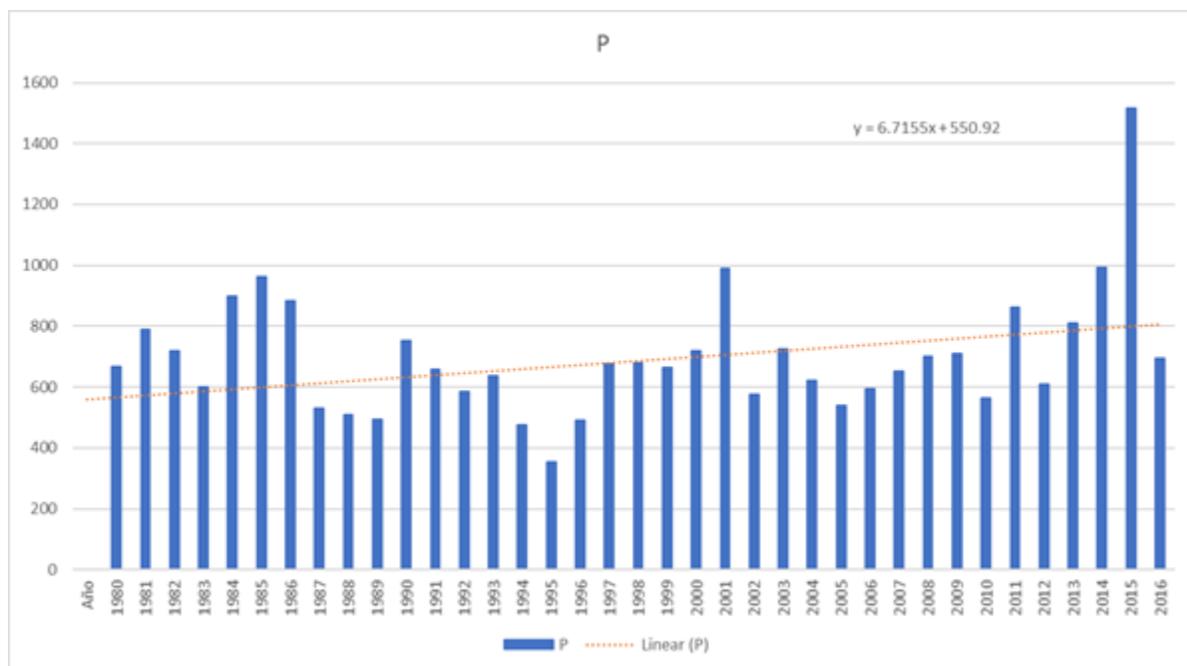


Ilustración 37 Serie de tiempo de precipitación anual (P) entre 1980 y 2015 (estación BO2021)

3.6 Análisis de Agua

Para el análisis de agua utilizamos el índice de agua modificada (MNDWI – sección 3.2.2).

3.7 Conclusiones sobre el análisis de bofedales y glaciares

En conclusión, los resultados del análisis del comportamiento espaciotemporal de los índices NDVI y MNDWI sugieren variaciones estacionales distintas. La evaluación de la serie de tiempo NDVI indica que los bofedales tienden a ser más verdes durante la estación húmeda/cálida,

cuando muy probablemente hay una mayor disponibilidad de agua y temperaturas más altas. Además, es posible observar un efecto altitudinal en estos índices para los bofedales.

Para confirmar estas observaciones, sería ideal la recopilación de información de evapotranspiración y inundación en los meses húmedos y también hacer una validación en terreno de las características de los bofedales en cada estación y a las distintas alturas, así como de los tipos de vegetación. Se recomienda elaborar una nueva clasificación de los bofedales en base a los índices de vegetación y de inundación para eliminar unidades que posiblemente fueron clasificadas de manera inapropiada.

El análisis multitemporal de la extensión del campo de nieve y de los glaciares indica una pérdida rápida del área glaciár. Interesantemente, observamos un cambio a temperaturas mínimas más frías y con más nieve estacional durante el periodo seco/frío. Este puede ser un proceso de compensación a los efectos del cambio climático, el cual no es suficiente para compensar la pérdida de área glaciár.

Con el objetivo de compartir las observaciones del proyecto y de aumentar la comunicación acerca de los bofedales altoandinos se han desarrollado planillas de visualización de datos en Tableau (ver Apéndice 5). Estas podrán facilitar el dialogo con actores locales y tomadores de decisiones durante las próximas etapas de validación de resultados y futuras actividades de investigación.

4 Modelo conceptual WEAP

En este acápite se realizará la descripción del modelo hidrológico conceptual desarrollado para el presente estudio. Con el propósito de comprender el procedimiento para realizar el cálculo de Balance Hídrico, se describen los insumos utilizados, la metodología y los resultados obtenidos.

El modelo hidrológico es básicamente una combinación de los modelos hidrológicos desarrollados en los estudios “Un Marco de Análisis de Decisiones Robustas para Adaptación al Cambio Climático - Caso 1: Agua para La Paz y El Alto” (Escobar, 2013) y “Estudio de Diseño Técnico de Preinversión : Proyectos de Manejo Integral de Cuencas y Gestión Integral de Recursos Hídricos en microcuencas priorizadas de los municipios de Batallas y Pucarani, con enfoque de adaptación al cambio climático” (BETA-A&R, 2020). Si bien ambos estudios hicieron uso del modelo hidrológico WEAP para aplicaciones de balance hídrico, el modelo desarrollado en el estudio de BETA-A&R (2020) se enfoca principalmente en la modelación natural de las cuencas, sin considerar elementos estructurales como embalses y aprovechamientos hídricos. Por otro lado, el modelo del estudio Multipropósito considera a detalle la existencia de embalses y aducciones, pero cubre únicamente una parte del área de estudio requerida para este proyecto.

Por lo tanto, se ha definido como la mejor opción para los propósitos de este estudio el elaborar un único modelo hidrológico que combine las componentes de los estudios mencionados previamente. La base principal del modelo proviene del estudio de BETA-A&R (2020), este fue complementado con información referente a embalses y aducciones proveniente del modelo Multipropósito. Todo el detalle respectivo se describirá a continuación. El esfuerzo de producir el modelo conceptual permitió agrupar las diferentes fuentes de información y generar una base para guiar posteriores esfuerzos de monitoreo y validación la información. Este esfuerzo es típico en la planeación hídrica en que la base conceptual derivada de estudio como el presente, debe ser alimentada de forma continua en esfuerzos posteriores con información nueva y datos de monitoreo y validación. Esfuerzos similares de modelación en California y Bolivia demuestran la importancia del compromiso de los actores locales en mantener las herramientas analíticas para que su uso permita una mejor planeación para la seguridad hídrica, en este caso en la cuenca de Katari.

4.1 Delimitación de Cuencas

Para este estudio, la delimitación de cuencas y red hídrica base fue mantenida en base al estudio de BETA-A&R (2020). Sin embargo, para poder incluir apropiadamente elementos de embalses y aducciones presentes en el estudio de Escobar et al (2013), se desarrolló una delimitación más detallada en la zona de aguas arriba de las cuencas de estudio. En la Ilustración 38 se muestra el detalle de la delimitación de cuencas original del estudio BETA-A&R (2020) y Multipropósito respectivamente. La Ilustración 39 muestra la delimitación final utilizada para el presente estudio y los ríos principales.

El río Jacha Jahuirá atraviesa la cuenca Khata Khota, aguas abajo de Hichu Khota mientras que el río Khullu Kachi atraviesa las subcuencas Taypi Chaca (alto y bajo). Cabe señalar que el río nombrado Khara Khota atraviesa la Microcuenca 2 y no Khara Khota. A continuación, tal como en la práctica, se utilizan nombres de ríos y de subcuencas de forma intercambiable.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari



Ilustración 38. Delimitación de subcuencas en los estudios BETA-A&R (en amarillo) y Escobar et al (2013) (en verde)

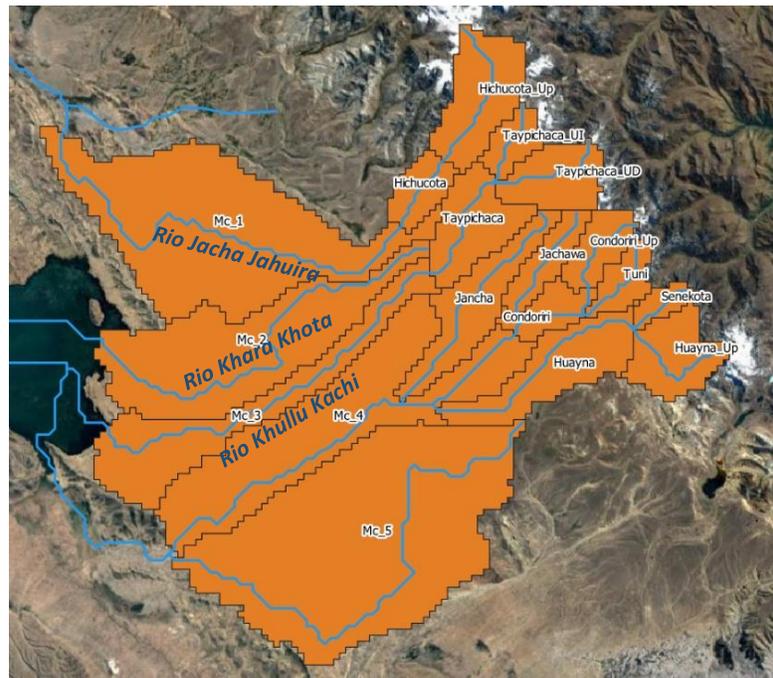


Ilustración 39. Delimitación de cuencas utilizada en el presente estudio y río principales

Tabla 10 muestra un resumen de las propiedades geográficas de las subcuencas mostradas en la Ilustración 39.

Tabla 10. Propiedades geográficas de las subcuencas en WEAP

N°	SUBCUENCA	Área [km ²]	Min Elev. [msnm]	Max Elev. [msnm]	Avg. Elev. [msnm]
1	Hichucota	19.22	4339	4922	4548
2	Hichucota_Up	48.17	4405	5449	4976
3	Microcuenca 1	203.31	3892	4645	4042
4	Microcuenca 2	138.33	3870	4813	4070.89
5	Taypichaca_UI	15.708	4507	5361	5005
6	Taypichaca_UD	32.445	4463	5344	4919
7	Taypichaca	41.12	4281	5191	4608
8	Microcuenca 3	87.96	3822	4537	3968
9	Janchalani	48.75	4069	5158	4484
10	Jachawaquiwiña	20.66	4452	5221	4803
11	Condoriri_Up	21.07	4492	5235	4841
12	Tuni	16.53	4438	5086	4713
13	Condoriri	18.59	4353	4814	4539
14	Senekota	9.30	4517	5142	4791
15	Huayna_Up	36.14	4510	5894	4894
16	Huayna	54.73	4133	4873	4500
17	Microcuenca 4	156.72	3834	4608	4034
18	Microcuenca 5	282.34	3833	4428	3953

4.2 Información Base

4.2.1 Climatología

En el estudio de BETA-A&R (2020) se hizo uso de series promedio por sub cuenca de precipitación y temperatura obtenida a través de un proceso de distribución espacial de información proveniente de estaciones meteorológicas con influencia en la zona de estudio. Considerando el análisis de GMET presentado en la Sección 2.3 y las experiencias exitosas del uso de esta información en otros estudios desarrollados en Bolivia, el presente estudio hizo uso de información proveniente de la grilla GMET para ambas variables meteorológicas. GMET (sección 2.3.1) cuenta con información para el periodo 1981-2015, por lo que el modelo hidrológico de este estudio abarcara este periodo.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

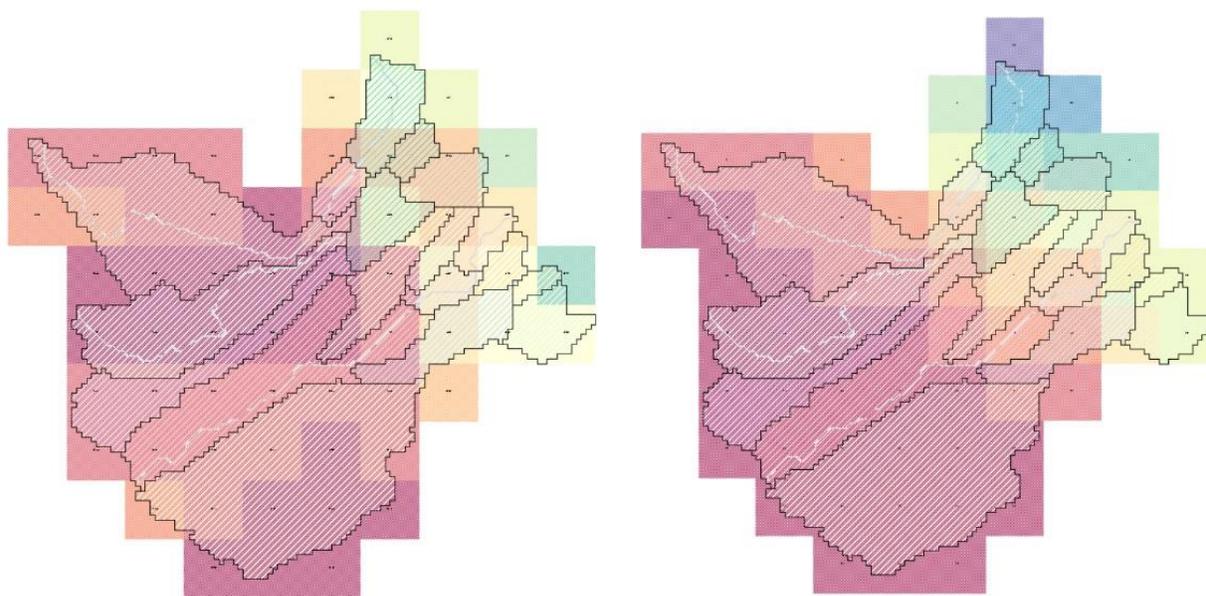


Ilustración 40. Grillas GMET en WEAP para variables de precipitación (izquierda) y temperatura (derecha)

En términos de información climatológica relacionada a las variables de Evapotranspiración Potencial, Humedad relativa, velocidad de viento y nubosidad, se han mantenido los valores originales provenientes del estudio de BETA-A&R (2020), los cuales se muestran en la Ilustración 41.

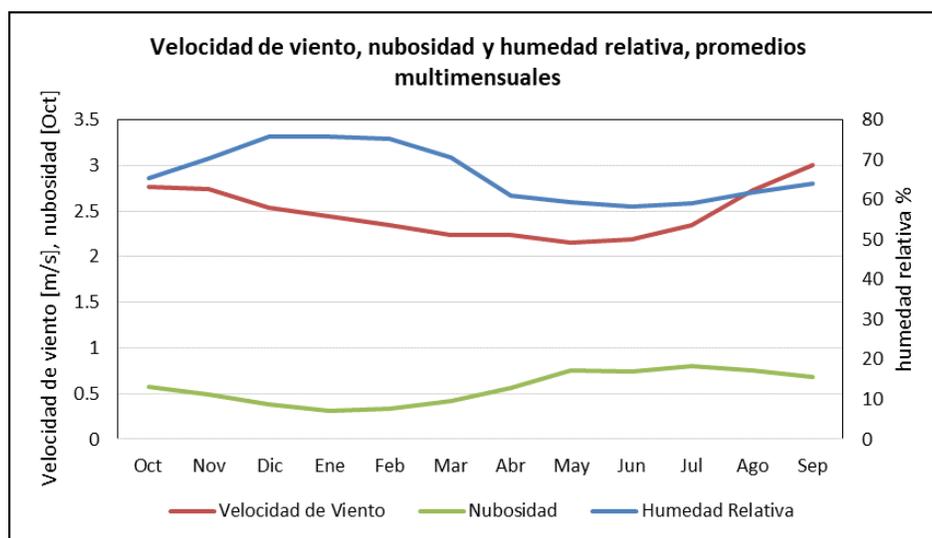


Ilustración 41. Variables de viento, nubosidad y humedad relativa utilizada para el estudio (Fuente: BETA-A&R (2020))

Tabla 11. Variables de viento, nubosidad y humedad relativa en números utilizada para el estudio (Fuente: BETA-A&R (2020))

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Humedad Relativa	65.3	70.3	75.7	75.8	75.3	70.5	61.0	59.2	58.3	59.0	61.8	64.0
Velocidad de Viento	2.76	2.74	2.54	2.44	2.35	2.24	2.24	2.16	2.19	2.35	2.73	3.01
Nubosidad	0.57	0.49	0.39	0.32	0.33	0.41	0.56	0.75	0.74	0.80	0.76	0.69

4.2.2 Uso de Suelo

WEAP cuenta con una opción para la delimitación automática la cual incluye la obtención de información de uso de suelo en base a información de tipo global proveniente de la Agencia Espacial Europea (ESA, Ilustración 42), que abarca 36 clases de cobertura de suelo con una resolución de 300 m. Para este estudio, se hizo uso de esta funcionalidad de WEAP para obtener información de uso y cobertura de suelo.

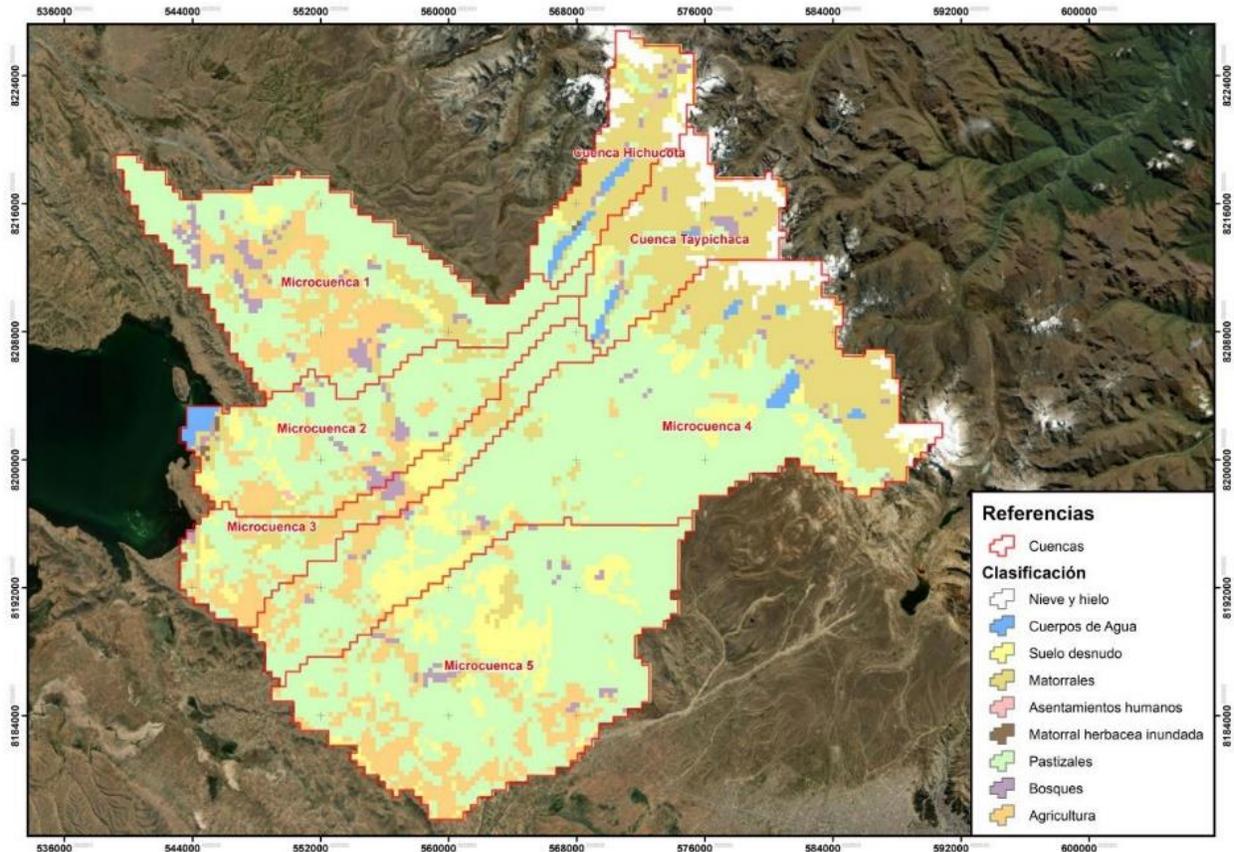


Ilustración 42. Clasificación de uso de suelo proveniente de ESA-CCI para el área de estudio (Fuente: BETA-A&R (2020))

4.2.3 Aporte de Glaciares

Como parte del estudio de BETA-A&R (2020) se calcularon los caudales de aporte proveniente de los glaciares presentes en las partes altas de la región de estudio Hichu Khota/Taypi Chaca (Ilustración 43). Estos aportes fueron mantenidos y usados en el modelo del presente estudio. Para más detalle respecto al procedimiento de cálculo, por favor referirse al estudio de BETA-A&R (2020).

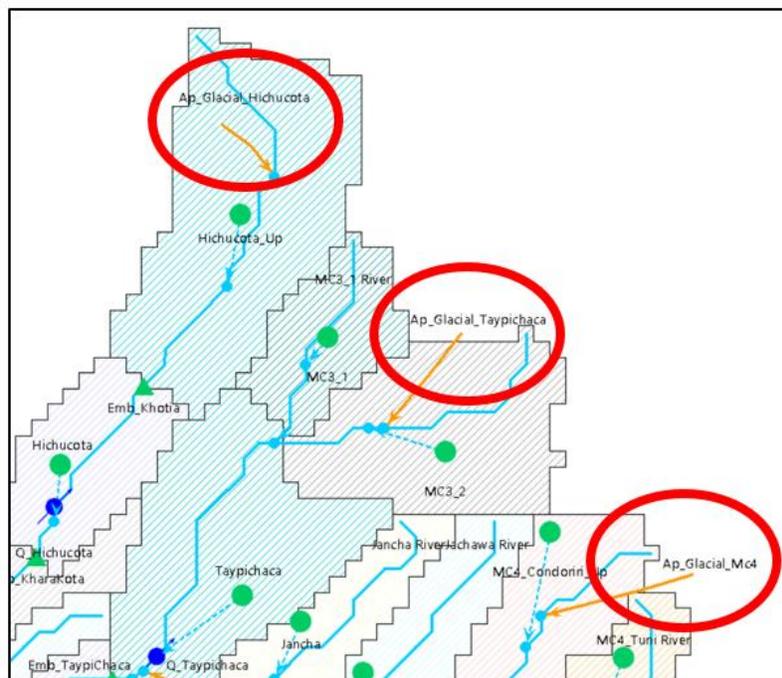


Ilustración 43. Aportes de glaciares (en círculo rojo). Fuente: BETA-A&R (2020)

4.3 Demandas de agua

Son tres los tipos de demanda que se consideraron en este estudio: Consumo Humano, Riego y Ganadería. El realizar un análisis detallado de la información de demanda en el área de proyecto está fuera del alcance de los objetivos del presente estudio, por lo que se ha visto por conveniente hacer uso de la información de demanda proveída por el estudio “Caracterización detallada de la cuenca Jacha Jahuirá y Cuenca Khullu Cachi como base para la formulación de los planes de Gestión Integrada de las Cuencas: Producto 6” (Fundeco, 2015).

Es sabido que existen estudios más actuales que se están llevando a cabo actualmente y que cubren en mayor detalle las demandas de agua existentes en esta región, sin embargo, no ha sido posible tener acceso a la información generada en dichos estudios.

En esta sección, se hace un resumen del detalle de la información obtenida por el mencionado estudio y los ajustes que se han realizado a esta para poder ser usada para los propósitos de este proyecto. Para más detalle respecto a las metodologías para obtención de estas demandas por favor referirse al estudio de Fundeco (2015) y PROINTEC (2015)

4.3.1 Consumo Humano

La demanda de agua potable es función de la población y del consumo per cápita. Debido a las dificultades que se tienen para poder estimar información y crecimiento poblacional en la región de estudio, en el estudio de Fundeco (2015) se ha visto por conveniente el uso de tasas de crecimiento generales a nivel municipio. En general, una tasa de crecimiento de 0.5% se ha aplicado para las poblaciones rurales que se consideran en el mencionado estudio.

De acuerdo con Fundeco (2015), 4 son las poblaciones que se abastecen de fuentes de agua superficial (ríos) y 2 se abastecen de los acuíferos de Batallas y Pucarani (Ilustración 44). Considerando que el presente estudio no considera la modelación de agua subterránea, ambos

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

acuíferos y los mencionados aprovechamientos se han incorporado en el modelo WEAP únicamente de manera esquemática, donde información referente a capacidad de acuífero y niveles no son proveídos.

Se ha tomado como población base las estimaciones del Censo 2012 y un crecimiento poblacional geométrico ya que se trata de comunidades sin limitaciones para el crecimiento (Fundeco, 2015). Para su implementación en el modelo hidrológico, las unidades de consumo consideradas están detalladas en la Tabla 12.

Tabla 12. Unidades de demanda de consume humano consideradas en el Modelo WEAP. Fuente: Fundeco (2015)

Unidad de consumo	Poblac. 2012 (hab)	Tasa de crec. (%)	Dotación (l/h-d)	Fuente de abastecimiento
JACHAJ_AP	3,677	0.5	52	Río Jacha Jahuira
SURIQUIÑA_AP	857	0.5	52	Río Jacha Jahuira
PACUNI_AP	73	0.5	52	Río Muluyo (Chirapaca)
BATALLAS_AP	9,640	1.0	60	Río Jacha Jahuira
BATALLAS_BAJO	249	0.5	52	Acuífero Batallas
PUCARANI_AP	7,613	1.7%	57	Acuífero Pucarani

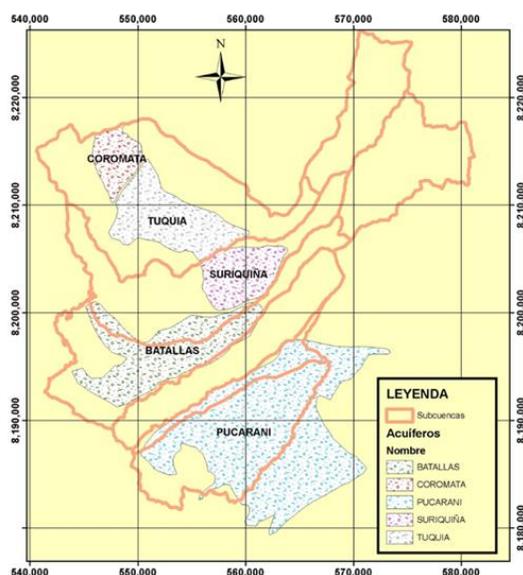


Ilustración 44. Acuíferos presentes por microcuenca priorizada, Jacha Jahuira y Khullu Cachi. (Fuente: Fundeco 2015)

4.3.2 Demanda de ganadería

Se han considerado 4 unidades de demanda ganadera de agua, las mismas que han sido consideradas en el estudio de Fundeco (2015). El detalle de la población pecuaria por unidad de consumo, así como el consumo per cápita se detalla en la Tabla 13 y Tabla 14 respectivamente. El número actual de cabezas de ganado ha sido mantenido para todo el periodo de modelación.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

Tabla 13. Población pecuaria por unidades de consumo. Fuente: Fundeco (2015)

Unidad de consumo	Bovino	Ovino	Camélido	Porcino
JACHAJ_GAN	4,778	15,563	4,611	953
SURIQUIÑA_GAN	827	1,060	547	243
BATALLAS_GAN	12,457	4,166	340	5,514
PUCARANI_GAN	10,000	15,000	5,000	4,000

Tabla 14. Consumo de agua del ganado. Fuente: Fundeco (2015)

Tipo de ganado	Consumo per-cápita (m ³ /año)
Bovino	27.4
Ovino	7.3
Camélido	7.3
Porcino	4.4

4.3.3 Demanda de Riego

En WEAP, la demanda de riego se incorpora en el modelo a través de la definición de las superficies por cultivo y los coeficientes de cultivo mensuales que definen los requerimientos de agua del cultivo en función del desarrollo de las plantas. En las siguientes tablas se presentan las superficies cultivadas por asociación y subsistema de riego, y los coeficientes de cultivo correspondientes. Esta información ha sido obtenida del estudio de Fundeco (2015) y PROINTEC (2015) e incluida en el modelo hidrológico.

Tabla 15. Cédula de cultivo sistema Khara Khota. Fuente: Fundeco (2015) y PROINTEC (2015)

Cultivo	Tupac Katari (Bajo)		Alto Peñas Kerani		Khara Khota Suriquiña		Khara Khota Total	
	(has)	(%)	(has)	(%)	(has)	(%)	(has)	(%)
Pasto	539.87	41.19%		0.00%	195.75	13.82%	735.62	26.27%
Papa	308.76	23.56%	32.00	43.24%	400.02	28.25%	740.77	26.45%
Cebada	76.99	5.87%		0.00%	127.30	8.99%	204.29	7.29%
Quinua	99.42	7.58%	12.00	16.22%	123.81	8.74%	235.23	8.40%
Avena	107.79	8.22%		0.00%	140.63	9.93%	248.42	8.87%
Haba	101.13	7.72%	15.00	20.27%	183.17	12.94%	299.30	10.69%
Alfalfa				0.00%	146.83	10.37%	146.83	5.24%
Cebolla	76.79	5.86%	15.00	20.27%	98.44	6.95%	190.23	6.79%
Total	1310.75		74.00		1415.95		2800.70	

Tabla 16. Cédula de cultivo sistema Taypi Chaca. Fuente: Fundeco (2015) y PROINTEC (2015)

Cultivo	Taypichaca Suriquiña		Taypichaca Palcoco		Total Taypichaca	
	(has)	(%)	(has)	(%)	(has)	(%)
Pasto	115.56	10.75%	0.00	0.00%	115.56	5.24%
Papa	325.21	30.26%	433.25	38.29%	758.47	34.38%
Cebada	119.67	11.14%	113.15	10.00%	232.82	10.55%
Quinua	104.07	9.68%	140.12	12.38%	244.19	11.07%
Avena	119.67	11.14%	174.81	15.45%	294.48	13.35%
Haba	141.15	13.13%	109.49	9.68%	250.64	11.36%
Alfalfa	133.65	12.44%	134.07	11.85%	267.72	12.13%
Cebolla	15.72	1.46%	13.30	1.18%	29.02	1.32%
Arveja			13.30	1.18%	13.30	0.60%
Total	1074.70		1131.50		2206.20	

Tabla 17. Coeficientes de cultivo mensuales. Fuente: Fundeco (2015) y PROINTEC (2015)

Cultivo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Pastos nativos	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50					
Papa (tardía)					0.20	0.50	1.02	1.30	1.30	0.95	0.60	
Cebada			0.37	0.76	1.15	0.60						
Quinua				0.40	0.70	0.75	0.85	1.00	0.70	0.40		
Avena (forraje)			0.35	0.75	1.15	0.60						
Haba (verde)			0.48	0.57	0.92	0.86	0.81					
Alfalfa				0.40	0.70	1.15	0.40	0.70	1.15	0.40	0.77	
Cebolla (cabeza)			1.15	1.16	1.38	1.16	1.14	0.94				
Arveja (verde)				0.44	0.53	0.97	0.89	0.82				

4.4 Representación de Bofedales en WEAP

En WEAP, es posible usar parte de la fracción de la escorrentía generada dentro una cuenca para fines de irrigación dentro de la misma cuenca. De esta manera, WEAP permite destinar una parte de toda la escorrentía para poder usarla en su irrigación, por más que haya demandas de alta prioridad aguas abajo. Cuando se usa esta funcionalidad, únicamente la escorrentía proveniente de la precipitación y de la humedad del suelo al inicio de cada paso de tiempo está disponible para irrigar. Para poder activar esta funcionalidad en WEAP, se debe indicar al modelo que procesos de irrigación ocurren dentro de la cuenca en el momento de su creación en la sección “schematics”.

Los bofedales de la región de estudio pueden ser vistos como partes de una cuenca que “consumen” o almacenan parte del agua que reciben por la precipitación. Por lo tanto, parte de la escorrentía generada por las áreas que ocupan los bofedales es absorbida por los mismos y el resto sigue su curso natural hacia los ríos. Este proceso podría ser representado con facilidad por la componente de irrigación de WEAP descrita en el anterior párrafo: El bofedal puede ser visto como una unidad de área cuya demanda ecológica puede ser representada como la “demanda de irrigación” que es cubierta por una parte de la escorrentía superficial. Una vez que la demanda ecológica del bofedal haya sido cubierta, la escorrentía restante es entregada a la red hídrica. En este sentido, se ha visto conveniente representar los bofedales como unidades de cuenca que tienen habilitada la opción de irrigación. Cabe mencionar que la representación de bofedales haciendo uso de esta metodología ha sido utilizada también en el estudio de Escobar et al (2013). Para más detalles respecto a la metodología por favor dirigirse al manual de WEAP.

La representación de bofedales en WEAP se ha realizado en base a los rangos de elevación utilizados para el análisis multitemporal desarrollado en secciones anteriores. Por lo tanto, Los bofedales en cada cuenca han sido clasificados en tres categorías:

- Bofedales bajos: Altura promedio por debajo de los 4200 msnm
- Bofedales medios: Altura promedio entre los 4200 y 4600 msnm
- Bofedales altos: Altura promedio por encima de los 4600 msnm

Cabe mencionar que no todas las cuencas cuentan con estos tres tipos de bofedales. Por ejemplo, la cuenca del río Khara Khota cuenta únicamente con bofedales medios y bajos. La Tabla 18 muestra las áreas en hectáreas de los tres tipos de bofedales presentes por sub-cuenca. Esta información ha sido incorporada en el modelo WEAP.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

Tabla 18. Caudal ecológico (en litros/s) estimado para los bofedales de Khara Khota y Taypi Chaca (Fuente: PROINTEC 2014).

Rio	Area segun tipo de bofedal (en hectareas)		
	Bajos (menor a 4200 msnm)	Medios (entre 4200 y 4600 msnm)	Altos (mayor a 4600 msnm)
Jacha Jahuira	448.22	116.36	390.28
Khara Kota	596.03	-	166.70
Kullu Kachi	261.71	243.59	460.95
Sehuenca	313.70	11.29	16.62
Huancane	40.31	-	-

WEAP también requiere que se proporcione el coeficiente K_c de los bofedales. Este coeficiente es usado por WEAP para poder calcular la demanda de irrigación de los bofedales, que vendría a representar en este caso la demanda ecológica de los bofedales. En este estudio se ha utilizado un $K_c=0.9$ constante para cada mes, que ha sido usado en estudio de Escobar et al (2013). Al ser un valor determinante en el cálculo de la demanda ecológica de los bofedales, es de vital importancia poder validar el valor de K_c . Durante la realización de este estudio no ha sido posible tener acceso a documentación de estudios que hayan realizado la evaluación de caudales ecológicos en la región de estudio, la demanda ecológica de los bofedales no ha podido ser validada. Por lo tanto, una validación de campo que esta mas alla del alcance de este estudio de los resultados de WEAP en base a observaciones de campo es recomendada en siguientes pasos que se deriven de este estudio.

El modelo también requiere que se proporcione el porcentaje máximo mensual de la escorrentía superficial generada que va a poder a ser utilizada para satisfacer la demanda. En el contexto de este estudio, se ha asumido un 15% de la escorrentía superficial disponible en cada mes. Cabe recalcar que este valor es únicamente asumido dentro el contexto de este estudio y quizá no sea representativo para las características de la región. Por lo tanto, una recomendación importante es verificar la validez de este valor asumido y ajustarlo en caso de ser necesario en etapas posteriores a este estudio.

En la sección 3.4 se ha realizado el análisis multi temporal del índice NDVI a nivel mensual. múltiples estudios han establecido que existe una relación directa entre el verdor reportado por NDVI y las tasas de evaporación de humedales. Para poder establecer un enlace entre el análisis de NDVI realizado en este estudio y el modelo WEAP, se requiere observaciones de campo de evapotranspiración por una duración de por lo menos un año. Este trabajo de campo va más allá del alcance actual del estudio, y recomienda que cuando esta relación está establecida se puede integrarla en WEAP. La importancia del estudio actual es que permite generar una plataforma preliminar y guiar las etapas posteriores de validación las cuales permitirán completar las herramientas conceptuales para su operatividad.

Ya que los bofedales están siendo representados como pequeñas unidades de cuenca, es posible obtener tasas de evaporación actual a nivel mensual de los bofedales a través de WEAP. Esta información de campo es muy valiosa para poder ajustar el modelo WEAP de forma que la dinámica hidrológica de los bofedales sea representada correctamente.

4.5 Incorporación de elementos estructurales

En el estudio de Escobar et al (2013) se ha desarrollado un estudio hidrológico en el modelo WEAP que comprende aporte de glaciares, precipitación-escorrentía, infraestructura hidráulica y demanda urbana. Se especifica en el documento del mencionado estudio que la información respecto a infraestructura hidráulica ha sido obtenida en colaboración con la Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento de La Paz y El Alto (EPSAS), razón por la cual se ha decidido usar en este estudio la información presente en Escobar et al (2013) en lo referente a estas componentes. Para el presente estudio, parte de estas componentes de infraestructura hidráulica y sus características presentes en Escobar et al (2013) que contemplan embalses y aducciones han sido incluidas (Tabla 19).

Tabla 19. Componentes de Infraestructura Hidráulica incluidas en el modelo WEAP obtenidas del estudio de Escobar et al (2013)

Elemento	Nombre en WEAP	Descripción
Embalse Khara Khota	Emb_KharaKota	Características físicas y niveles de operación
Embalse Taypi Chaca	Emb_Taypi Chaca	Características físicas y niveles de operación
Embalse Tuni	Emb_Tuni	Características físicas y niveles de operación
Aducción Janchallani	Aduc_Jancha	Aducción en el río Janchallani hacia el río Khullu Kachi
Aducción Jacha Waquiwinia	Aduc_Jacha	Aducción en el río Jacha Waquiwinia hacia el río Khullu Kachi
Aducción Condoriri	Aduc_Con	Aducción en la cuenca Condoriri hacia el río Tuni
Aducción Tuni	Aduc_Tuni	Aducción en la cuenca Tuni para abastecimiento en centros urbanos
Aducción Huayna Potosi	Aduc_Huayna	Aducción en la cuenca Huayna Potosi hacia el río Tuni

Se ha visto importante incluir los elementos descritos anteriormente debido a que representan importantes trasvases entre cuencas que influyen en la disponibilidad de recurso hídrico en las subcuencas de estudio. Para más detalle respecto a las componentes estructurales especificadas en la Tabla 19 por favor referirse al estudio de Escobar et al (2013).

4.6 Resultados preliminares del modelo WEAP

Las figuras a continuación muestran algunos resultados obtenidos con el modelo WEAP para los ríos Jacha Jahuira y Khullu Kachi. Cabe recordar que estos resultados no han sido validados debido a la falta de información de aforos en los diferentes ríos de la región de estudio. La validación del modelo WEAP es un paso sumamente importante para poder evaluar el performance, por lo que una recomendación inmediata es la obtención de información de aforos en los diferentes ríos de la región del estudio para poder validar los resultados de WEAP. Resultados adicionales están disponibles en el Apéndice 3.

4.6.1 Jacha Jahuira

Se observa en términos generales que las diferentes demandas logran ser cubiertas a excepción de la demanda ecológica por parte de los bofedales (Ilustración 45 e Ilustración 46). Déficit para cubrir esta demanda en bofedales localizados en la zona media y baja se identifica a lo largo de todo el año en un porcentaje cerca al 30 % y 60 % respectivamente. Esto implica que en promedio la demanda ecológica de bofedales logra ser cubierta en un 70% y 40%.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

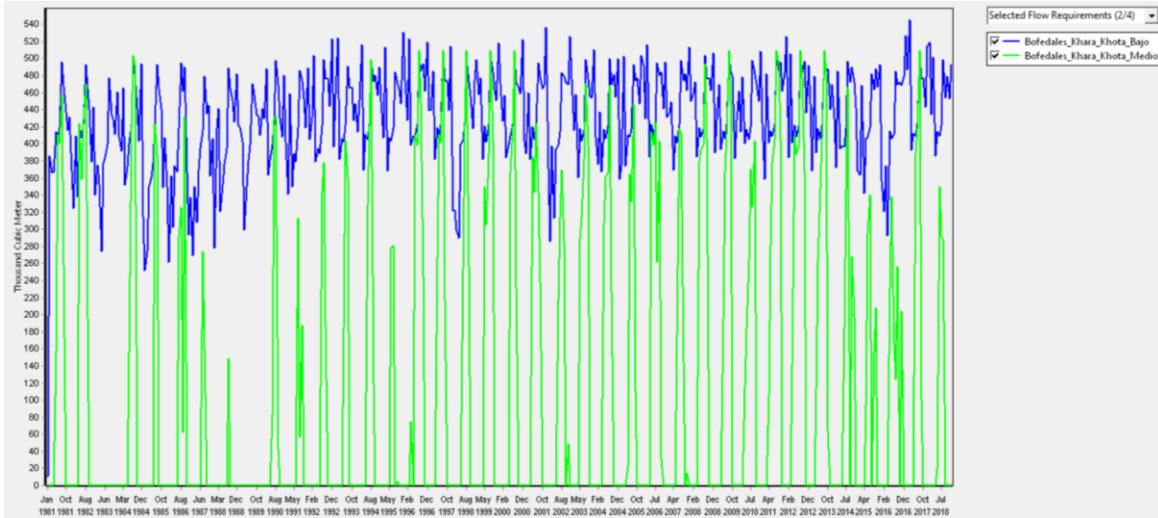


Ilustración 45 Demanda mensual ecológica de Bofedales en la cuenca Khara Khota no cubierta

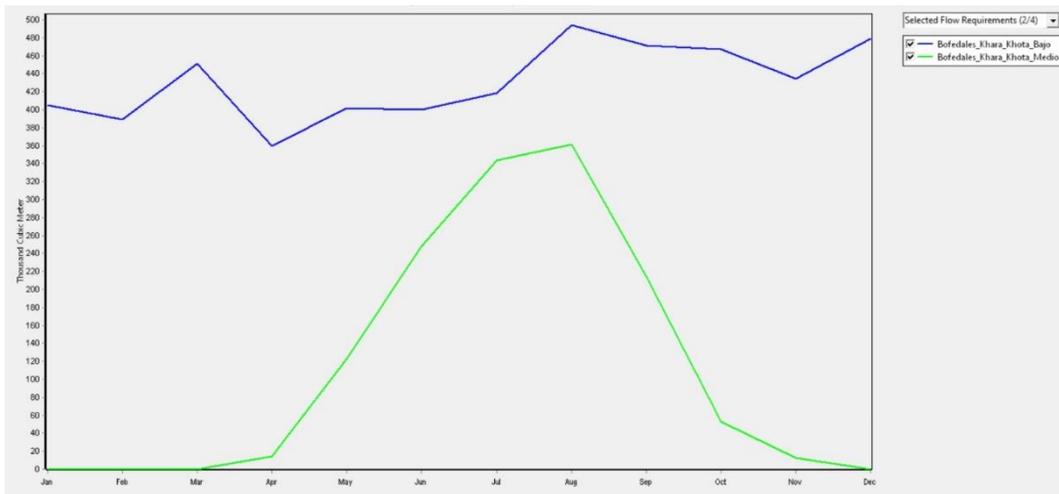


Ilustración 46. Promedio mensual de demanda ecológica de Bofedales en la cuenca Khara Khota no cubierta

4.6.2 Khullu Kachi

Al igual que en Jacha Jahuira, las diferentes demandas en el rio Khullu Kachi logran ser cubiertas, incluida la demanda ecológica de los Bofedales de Taypi Chaca que logra ser cubierta en su totalidad.

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

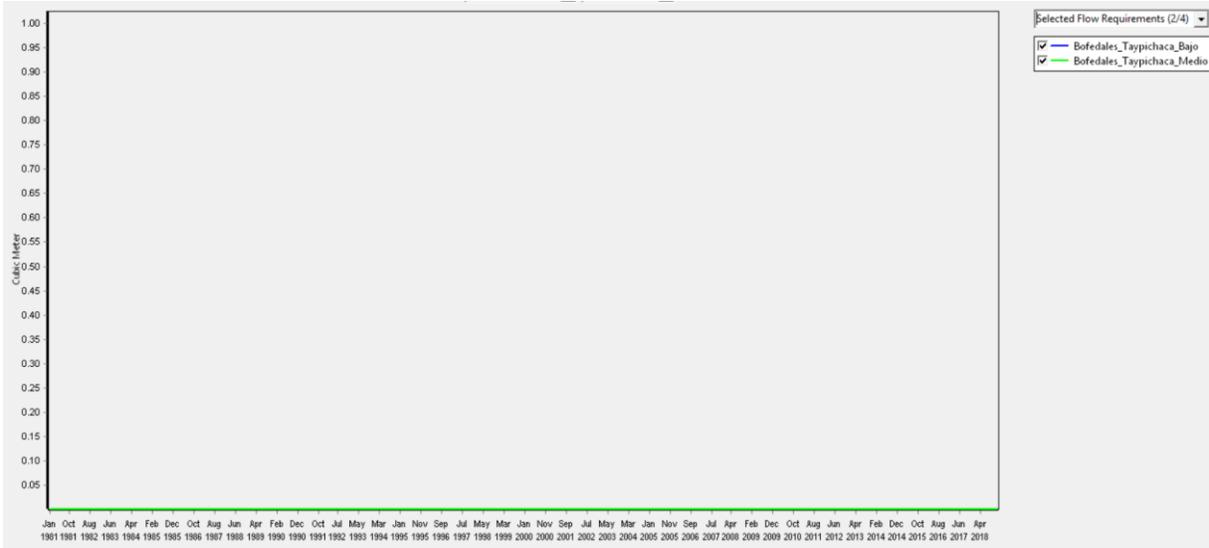


Ilustración 47. Demanda mensual ecológica de Bofedales en la cuenca Taypi Chaca no cubierta

5 Conclusiones y recomendaciones

Este estudio se enfocó en generar información para entender los Bofedales de la cuenca Katari de forma que se pueda incorporar el rol de los mismos en la planeación de agua. Los bofedales altoandinos son humedales que se encuentran en las mesetas andinas a más de 3800 m de altura. Son una pradera nativa poco extensa con permanente humedad. Reciben aguas que se almacenan en las planicies, proviniendo de precipitaciones pluviales, deshielo de glaciares y principalmente afloramientos superficiales de aguas subterráneas. Los bofedales tienen un valor crítico con respecto al suministro de agua, ya que regulan el ciclo hídrico y el ciclo de los suelos y nutrientes en las cuencas hidrográficas montañosas. La salud de los humedales se está deteriorando debido al cambio climático y al retroceso de los glaciares. Esto se ve agravado por la construcción de presas para abastecer la zona urbana de La Paz y el Alto, así como el sobrepastoreo y la extracción de agua subterránea para la actividad minera.

Para avanzar nuestro entendimiento de las características de Bofedales y avanzar el desarrollo de un modelo de gestión de agua cual puede permitir evaluación integral de sus demandas y función hidrológicas hemos investigado las características eco-hidrológicas de los bofedales a través de datos de sensores remotos y generado un modelo nuevo en base de la plataforma WEAP integrando información pertinente y disponible en este momento. El modelo conceptual de WEAP integra explícitamente los Bofedales y permite evaluar demandas y aportes ecológicos y relacionarlos a otros usos de agua en la cuenca. Un enfoque en el desarrollo de este modelo fue la integración y mejor representación de otras demandas de agua, en particular demandas agrícolas y urbanas. En base de este modelo proponemos un grupo de acciones de mediciones en campo para poder validarlo como paso siguiente derivado de este estudio inicial.

El análisis de imágenes satelitales disponibles para las microcuencas del proyecto permitió la construcción de un base datos multitemporales de imágenes fuente e índices derivadas las cuales capturan la variabilidad y cambios en las condiciones eco-hidrológicas durante los últimos 35 años (1986-2020). En total, 614 imágenes (447 Landsat 5 y 167 Landsat 8) fueron procesadas y verificadas en términos de calidad y nubosidad, resultando en un juego de 222 imágenes útiles (libre de nubes y/o errores de sensor) para el estudio del proyecto. Tres índices pertinentes para análisis eco-hidrológicos fueron calculados para cada fecha de observación: Índices de vegetación (NDVI), agua (MNDWI) y nieve (NDSI). Este esfuerzo requirió una dedicación de tiempo y análisis para poder producir las imágenes útiles que informaron el estudio.

El análisis multitemporal de nieve, como ha sido indicado en estudios anteriores en la Cordillera Real y en la región Andina más general, confirma una pérdida rápida de las capas glaciares. A nivel regional, hemos observado una disminución del área glaciar de aproximadamente 43% entre 1986 y 2020 y la extrapolación lineal indica que es muy probable que se pierdan todos los glaciares entre 2070 y 2080. En las dos microcuencas del proyecto multipropósito Hichu Khota y Taypi Chaca, hemos observado una disminución del área glaciar de 57% y 61% respectivamente. La extrapolación lineal indica que es muy probable que se pierdan los glaciares de estas microcuencas antes de 2040. En términos de impactos al ciclo hidrológico, es muy probable que los caudales en los ríos principales hayan sido elevados en las últimas décadas en comparación con condiciones históricos, y que van a continuar ser elevados hasta la pérdida completa de glaciares. Lamentablemente, por falta de observaciones de caudal en esta región no podemos

corroborar esta hipótesis. Recomendamos que inversiones de infraestructura de monitoreo prioricen la implementación de estaciones automáticas hidrométricas en puntos de salida de estas cuencas.

Los impactos de cambio climático también se manifiestan en las series de tiempo de datos climáticos. En el periodo 1980-2015 observamos una divergencia de temperatura máximas (tendencia positiva) y mínimas (tendencia ligeramente negativa) anuales y tendencia positiva de precipitación anual. En términos de comportamiento multitemporal de vegetación de Bofedales observamos una tendencia positiva en NDVI cuál puede ser explicada por una productividad más alta debido a las temperaturas más altas y más lluvia en la época cálida/húmeda. Como hay una falta de estaciones climatológicas en la parte alta de la cuenca recomendamos que inversiones de infraestructura de monitoreo priorizan la implementación de estaciones automáticas meteorológicas en esta zona.

El análisis multitemporal de vegetación en base de NDVI y elevación de Bofedales, resultó en una clasificación generalizada de tres tipos (cuenca baja, mediana y alta). En cada zona altitudinal observamos una variabilidad fenológico fuerte. En las tres zonas, los Bofedales siguen verdes todo el año, pero en la zona baja manifiesten valores de NDVI más altos. Esto puede ser principalmente por diferencias en temperatura lo cual limita la productividad primaria de los Bofedales. La clasificación actual de Bofedales incluye algunas áreas mal-clasificadas las cuales pueden ser depuradas en base a parámetros de terreno y vegetación. En otros estudios en la literatura se ha observado una relación entre NDVI y evapotranspiración de vegetación. Recomendamos que en estudios futuros se hagan mediciones específicas de evapotranspiración de Bofedales en las distintas zonas de elevación y hacer una correlación entre estos parámetros. Este tipo de información sería clave para alimentar el modelo conceptual de WEAP y así hacerlo más operacional.

En contraste con las señales fuertes observadas en las series de tiempo de MDSI y NDVI, el análisis multitemporal de agua (MNDWI) indica que la variabilidad temporal de área superficial de agua es limitada y se concentra en variaciones de cuerpos de agua. Esta variabilidad de agua superficial en Bofedales es limitada a solo unos eventos extremos. Sería importante hacer una validación en campo, con un enfoque en los Bofedales altos de la cuenca en la época de lluvia para corroborar esta conclusión. Esta validación también permite validar el modelo conceptual de WEAP.

En base de la variabilidad estacional podemos concluir que los Bofedales están alimentados por un manto freático (agua subterránea poco profunda) y que su demanda hídrica aumenta en la época cálida/húmeda. Las pocas observaciones de piezómetros indican que este manto freático es muy constante y probablemente mantenido por aguas subterráneas con tiempos de residencia altos. En base de estudios en sistemas semejantes como Purapurani, se recomienda hacer unos estudios de isotopos de agua y establecer los tiempos de residencia. Estas observaciones pueden ser usados para pronosticar cambios potenciales de perdida de recarga por glaciares y apoyar la validación del modelo conceptual.

Todavía es necesario profundizar más la compleja relación entre los procesos hidrológicos e hidrogeológicos que gobiernan el funcionamiento de los bofedales de altura. En particular, se podría planificar una campaña de validación y de recolección de datos de evapotranspiración y de niveles de agua subterránea para mejorar la clasificación de los bofedales según su

comportamiento hidrológico. Adicionalmente se podría hacer un mapeo más completo de las especies de bofedales con aportes de actores locales y de la investigadora Rosa Isela Meneses.

El modelo WEAP conceptual del proyecto multipropósito integra demandas de agua en las microcuencas, incluyendo una representación de los bofedales como requerimientos de caudal ecológico. Dicho modelo conceptual abarca el alcance del proyecto actual e informa los pasos siguientes de estudios posteriores. En una próxima etapa, se recomienda calibrar y validar el modelo conceptual WEAP y refinar la representación de los bofedales en base a mediciones en el campo. El efecto del cambio climático ha sido considerado de forma preliminar en el estudio y se recomienda que, en una próxima fase, podríamos incluir un escenario de cambio climático y otros escenarios de crecimiento de población, desarrollo de infraestructura, etc. en el modelo WEAP.

Por último, con el objetivo de compartir las observaciones del proyecto y de aumentar la comunicación acerca de los bofedales altoandinos se han desarrollado planillas de visualización de datos en Tableau. Estas podrán facilitar el dialogo con actores locales y tomadores de decisiones durante las próximas etapas de validación de resultados y futuras actividades de investigación. Dicha visualización es un avance innovador en la forma de presentar esta información que se logró realizar con este estudio y que se podría potenciar para su uso en la de cuencas participativa con los actores involucrados.

Este estudio avanza en la compilación de información base y su organización para el análisis del rol de los bofedales en la planeación hídrica. Este proyecto ha permitido poner esta información disponible de forma preliminar a través de herramientas como WEAP y Tableau para ayudar a la conservación de este ecosistema sensible. De esta forma, el proyecto cumplió con el objetivo de dar un paso hacia la clasificación de los Bofedales, contribuyendo como valor agregado además al entendimiento de su rol en la producción de agua y a la importancia de reforzar esfuerzos de monitoreo. Los resultados presentados y los lineamientos de fases siguientes permitirán a los tomadores de decisiones priorizar sus acciones de conservación, monitoreo y planeación hídrica en la región.

6 Referencias

- Baraer, M., Mark, B. G., McKenzie, J. M., Condom, T., Bury, J., Huh, K.-I., Portocarrero, C., Gómez, J. and Rathay, S. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*, 58(207). 134–50. DOI: 10.3189/2012JoG11J186
- BETA-A&R, C. B. S. A. R. (2020). Estudio de Diseño Técnico de Preinversión “Proyectos de Manejo Integral de Cuencas y Gestión Integral de Recursos Hídricos en microcuencas priorizadas de los municipios de Batallas y Pucarani, con enfoque de adaptación al cambio climático. Retrieved from Ministerio de Medio Ambiente y Agua MMAyA
- Cooper, D. J., Wolf, E. C., Colson, C., Vering, W., Granda, A. and Meyer, M. (2010). Alpine Peatlands of the Andes, Cajamarca, Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 42(1). 19–33. DOI: 10.1657/1938-4246-42.1.19
- Clark, M. P., & Slater, A. G. (2006). Probabilistic Quantitative Precipitation Estimation in Complex Terrain. *Journal of Hydrometeorology*, 7(1), 3-22. doi:10.1175/jhm474.1
- EPSAS, E. P. S. d. A. y. S. (2019). Un nuevo sistema de indicadores controlará Sequías en Bolivia Retrieved from <http://www.epsas.com.bo/web/un-nuevo-sistema-de-indicadores-controlara-las-sequias-en-bolivia/>
- Escobar M., Purkey D. R., Forni L., Yates D., Lima N.A. & Quisbert H. (2013). “Un Marco de Análisis de Decisiones Robustas para Adaptación al Cambio Climático - Caso 1: Agua para La Paz y El Alto”. Stockholm Environment Institute SEI, Ministerio de Medio Ambiente y Agua MMAyA, Banco Interamericano de Desarrollo BID.
- Fonkén, M. S. M. (2015). An introduction to the bofedales of the Peruvian high Andes - Poster BIOCON 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.20373.83686
- Hall D.K., George A. Riggs, Vincent V. Salomonson, (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data, *Remote Sensing of Environment*, 54:2: 127-140, DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P
- Hüttich, C., Reschke, J., Keil, M., Dech, S., Weise, K., Beltrame, C., Fitoka, H., & Paganini, M. (2011): Using the Landsat Archive for the Monitoring of Mediterranean Coastal Wetlands: Examples from the GlobWetland-II Project. *Earthzine*, available online: <http://www.earthzine.org>.
- IUCN (2017). Peatlands and climate change | IUCN. November 2017. <https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/peatlands-and-climate-change>
- Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A.K., Wang, T.J., Muñoz, A.R. and Turak, E. (2015) Evaluation of MODIS spectral indices for monitoring hydrological dynamics of a small, seasonally - flooded wetland in southern Spain: open access. In: *Wetlands*, 35 (2015)5 pp. 851-864
- Loza Herrera, S., Meneses, R. and Anthelme, F. (2015). Comunidades vegetales de los bofedales de la Cordillera Real (Bolivia) bajo el calentamiento global Plant communities of high-Andean wetlands of the Cordillera Real (Bolivia) in the face of global warming. *Ecología En Bolivia*, 50. 39–56.

McFeeters S. K. (1996) The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17:7, 1425-1432, DOI: 10.1080/01431169608948714

Meneses, R., Loza Herrera, S., Domic, A., Palabral-Aguilera, A., Zeballos, G. and Ortuño, T. (2015). Bofedales altoandinos. In 191–205

MINAM (2019). Guía de evaluación del estado del Ecosistema de bofedal. Ministerio del Ambiente, Peru, Lima, Peru

Newman, A. J., Clark, M. P., Craig, J., Nijssen, B., Wood, A., Gutmann, E., . . . Arnold, J. R. (2015). Gridded Ensemble Precipitation and Temperature Estimates for the Contiguous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 16(6), 2481-2500. doi:10.1175/jhm-d-15-0026.1

PROINTEC. 2014. Estudio integral TESA para el proyecto multipropósito de riego y agua potable para los municipios de Batallas, Pucarani y El Alto (ATN/SX-13423-BO). Determinación de Régimen de caudales ecológicos.

PROINTEC. 2015. Estudio TESA Proyecto Multipropósito de Riego y Agua Potable para los Municipios de Batallas, Pucarani y El Alto. Mejoramiento Sistemas de Riego Cuenca Jacha Jahuirá.

PROINTEC. 2015. Estudio TESA Proyecto Multipropósito de Riego y Agua Potable para los Municipios de Batallas, Pucarani y El Alto. Mejoramiento Sistemas de Riego Cuenca Khullu Cachi.

Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1). 81–102. DOI: 10.5194/tc-7-81-2013

Rabatel, A., Machaca, A., Francou, B. and Jomelli, V. (2006). Glacier recession on Cerro Charquini (16° S), Bolivia, since the maximum of the Little Ice Age (17th century). *Journal of Glaciology*, 52(176). 110–18. DOI: 10.3189/172756506781828917

Rebaudo, F. and Dangles, O. (2014). Un modelo socio-ecológico para establecer escenarios de dinámica de bofedales frente a los cambios globales., 49. 141–53.

Squeo, F. A., Warner, B. G., Aravena, R. and Espinoza, D. (2006). Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*, 79(2). DOI: 10.4067/S0716-078X2006000200010

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8:2: 127-150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0

Verbist, K., Schoolmeester, T., Johansen, K., Baker, E. and Hesping, M. (2018). The Andean Glacier and Water Atlas

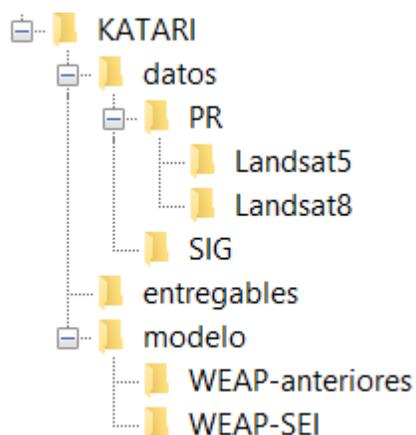
Verzija, A. and Quispe, S. G. (2013). The System Nobody Sees: Irrigated Wetland Management and Alpaca Herding in the Peruvian Andes. *Mountain Research and Development*, 33(3). 280. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00123.1

Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing* 27(14):3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179

7 Apéndices

7.1 Apéndice 1. Resumen de datos y productos

Se puede acceder a los archivos en el servidor ftp: 50.194.21.10, carpeta KATARI con el nombre de usuario: FTP_MMAYA y el pass: MMAYA_ftp!. Las carpetas en el servidor ftp esta organizadas de la manera siguiente:



La lista de productos entregados es:

- **Entregable 1. Plan de trabajo**
- **Entregable 2.1. Geodatabase**

El entregable describe la revisión de datos existentes y la nueva geodatabase proporcionada. La nueva database se encuentra en la carpeta 'SIG'.

- **Entregable 2.2. GMET**

Este entregable describe la validación de GMET en la cuenca Katari.

- **Entregable 2.3. Datos Satelitales y Base de datos Landsat**

El entregable describe la información contextual para el análisis. La base de datos Landsat se encuentra en las carpetas 'Landsat5' y 'Landsat8'.

- **Entregable 3 Modelo WEAP**

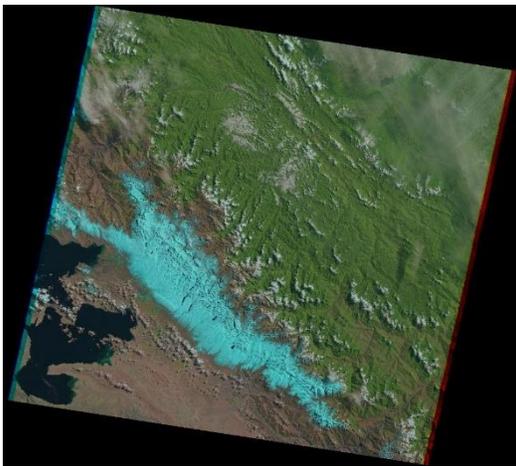
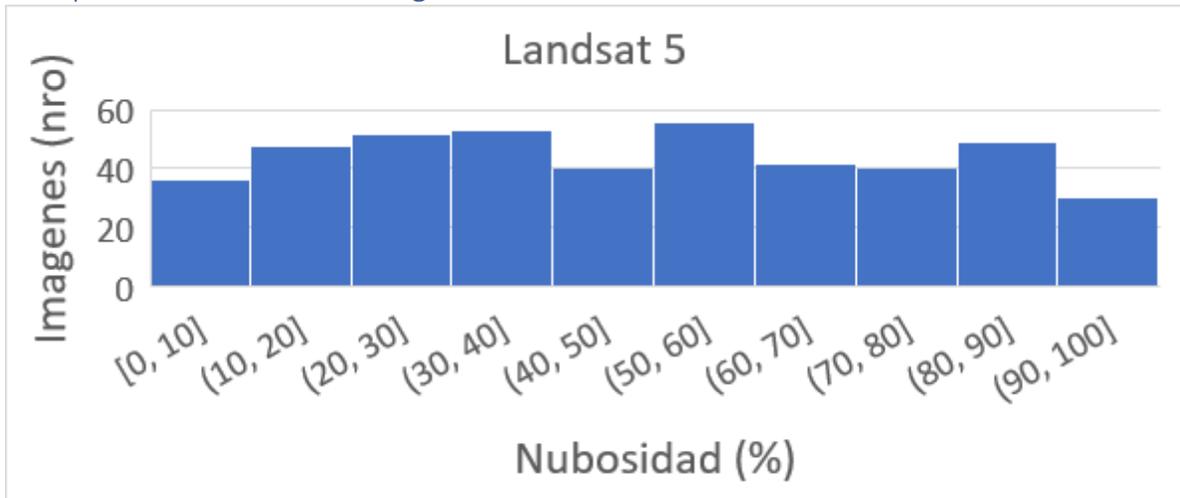
El modelo WEAP se encuentra en la carpeta 'WEAP SEI'. La documentación del modelo está incluida en el presente reporte.

- **Entregable 4: Resumen de reuniones**

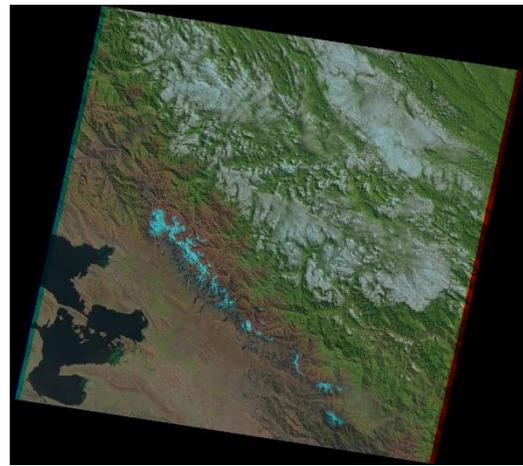
El listado de reuniones y de los participantes se presenta en el Entregable 4. La grabación de las reuniones puede ser proporcionada.

- **Entregable 5 Reporte final**

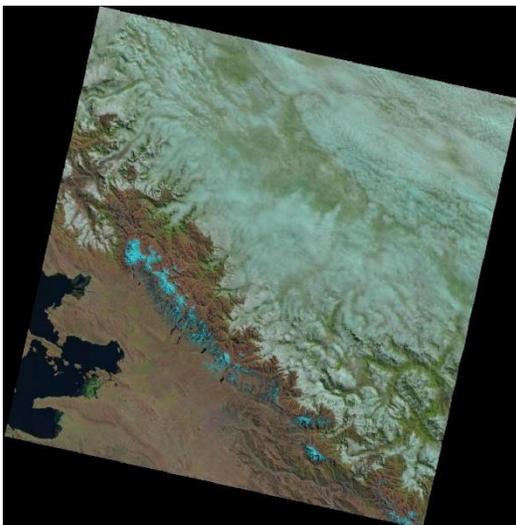
7.2 Apéndice 2. Resumen imágenes satelitales



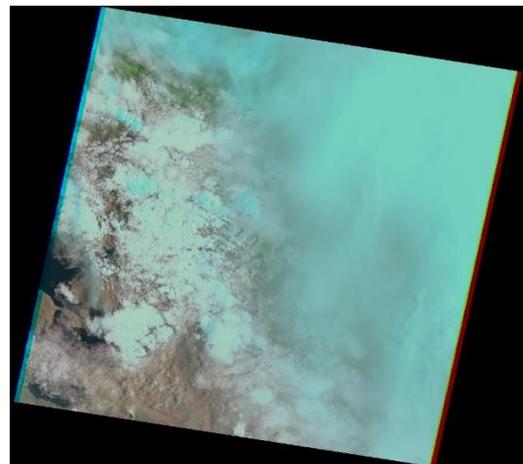
~5% - 26-08-1990



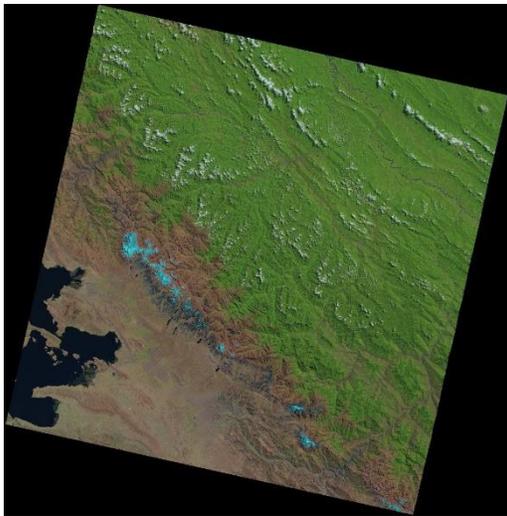
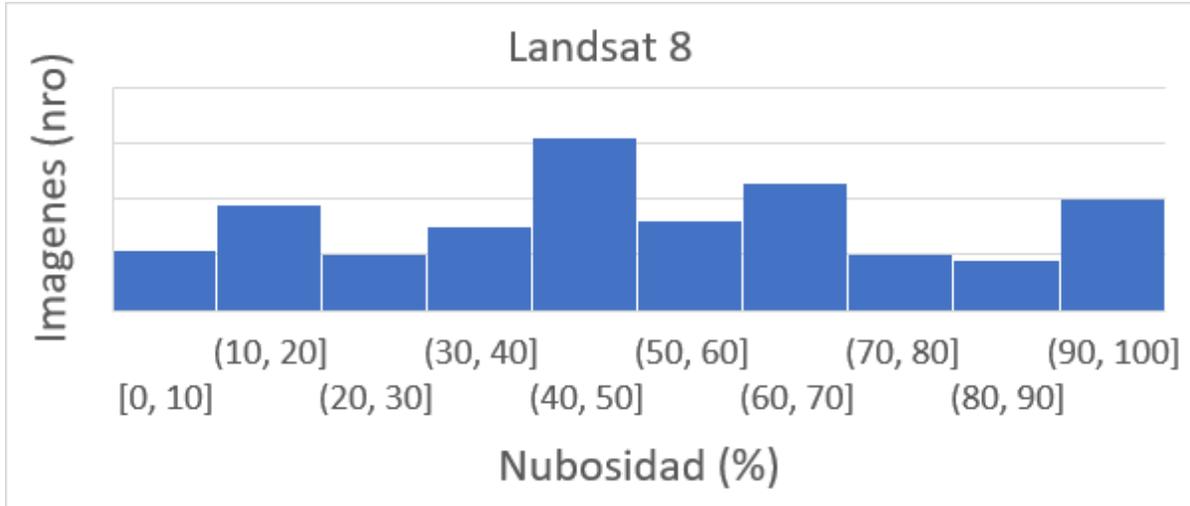
~20% - 30-05-1993



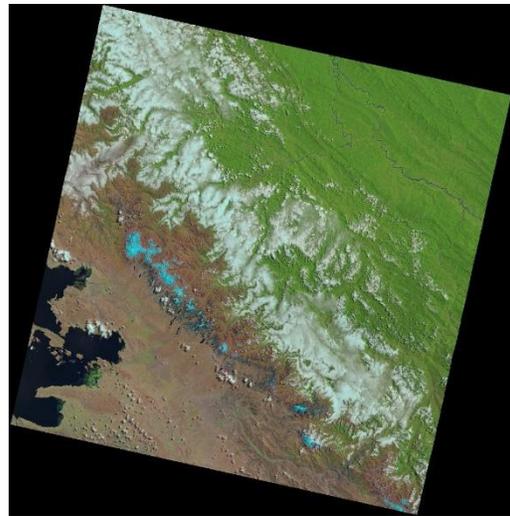
~60% - 24-07-2013



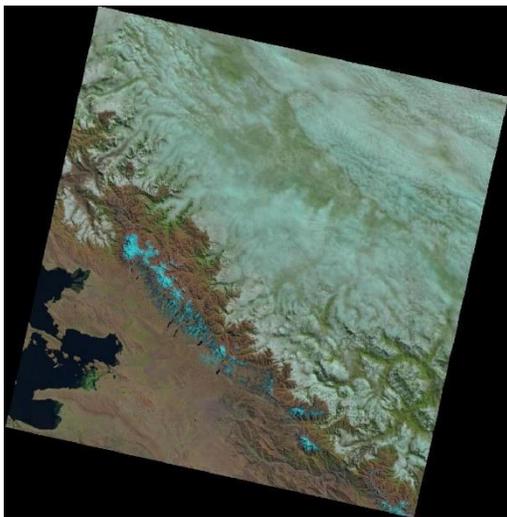
~100% - 29-10-1990



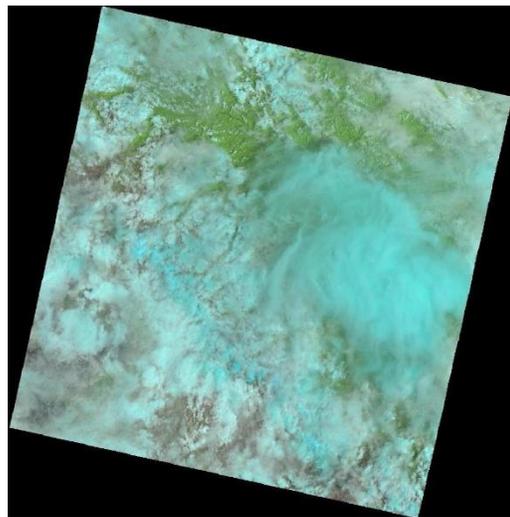
~3.25% - 17-08-2016



~20%



~50%



~100%

7.3 Apéndice 3. Resultados del análisis de GMET en Katari

Estación BO2013

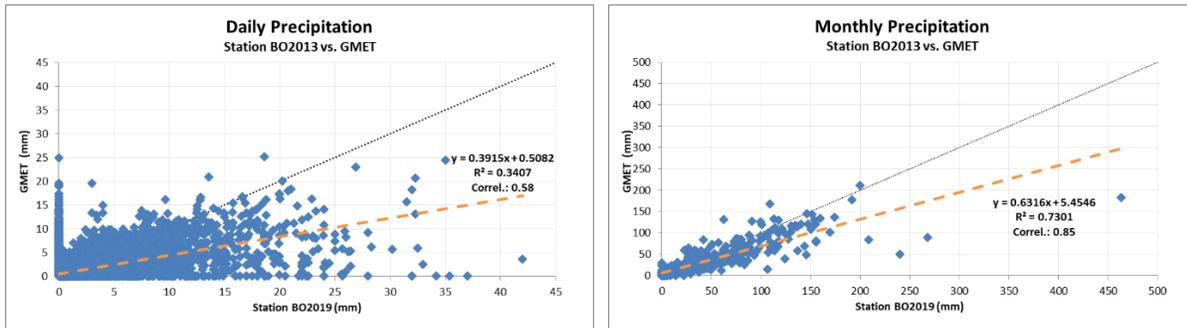


Ilustración 48 Correlación entre GMET y Estación BO2013: datos diarios (izquierda); mensuales (derecha)

Estación BO2019

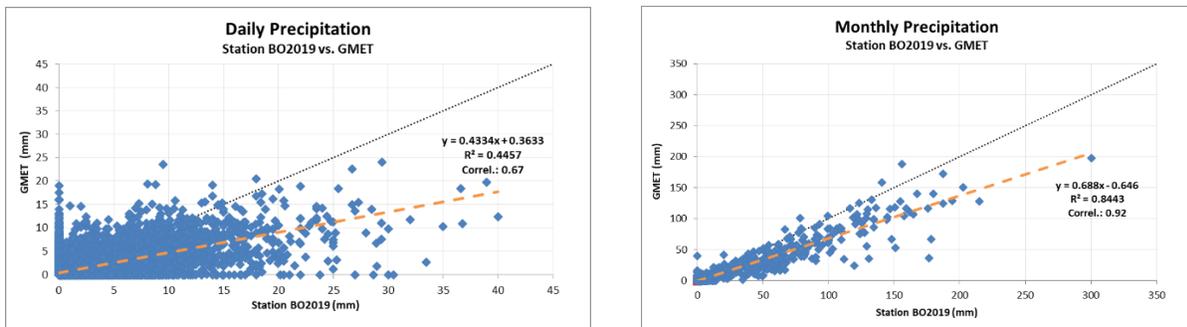


Ilustración 49 Correlación entre GMET y Estación BO2019: datos diarios (izquierda); mensuales (derecha)

Estación BO2021

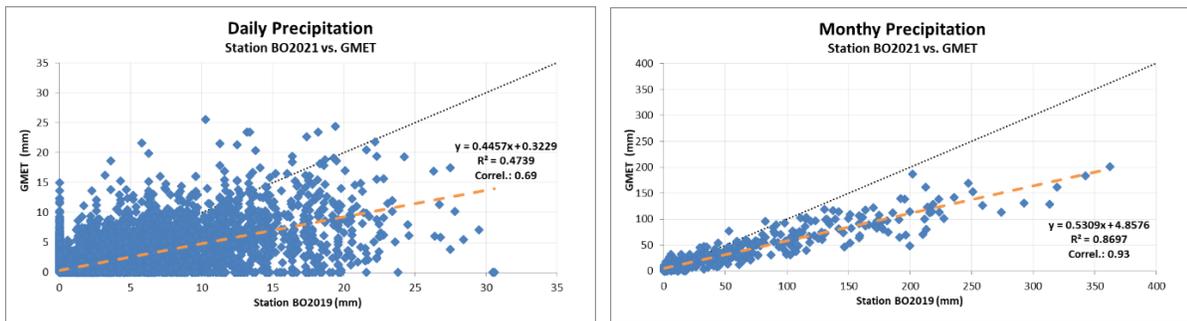


Ilustración 50 Correlación entre GMET y Estación BO2021: datos diarios (izquierda); mensuales (derecha)

Estación BO2047

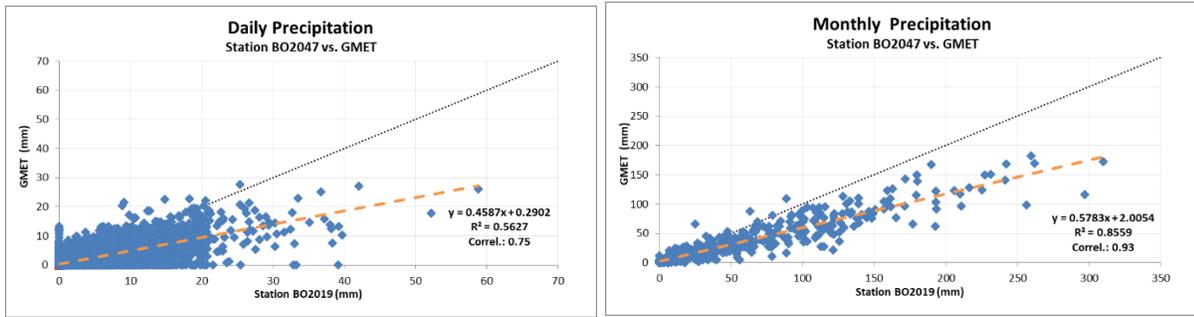


Ilustración 51 Correlación entre GMET y Estación BO2047: datos diarios (izquierda); mensuales (derecha)

Estación BO2057

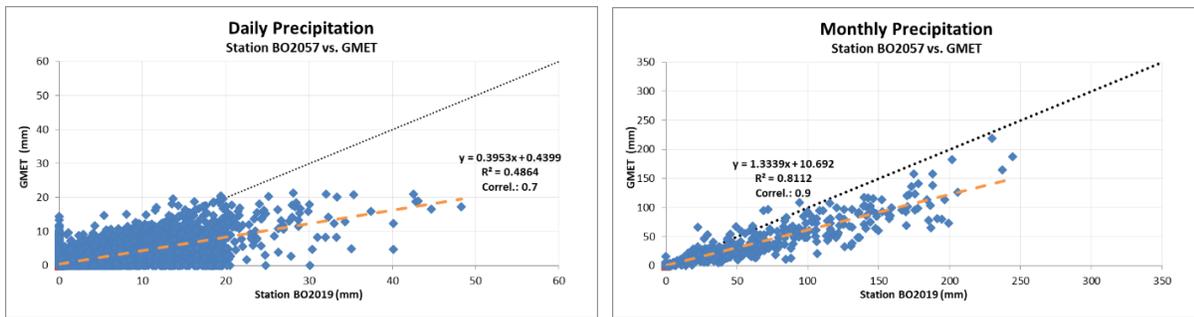


Ilustración 52 Correlación entre GMET y Estación BO2057: datos diarios (izquierda); mensuales (derecha)

Estación BO2068

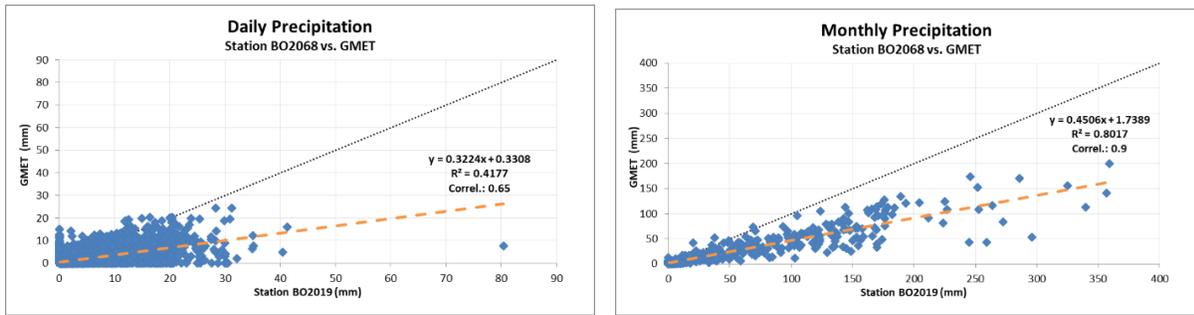


Ilustración 53 Correlación entre GMET y Estación BO2069: datos diarios (izquierda); mensuales (derecha)

Estación BO2074

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

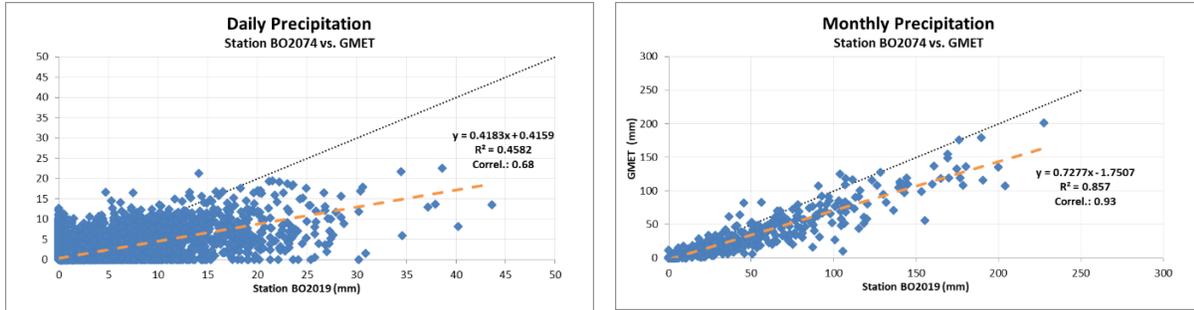


Ilustración 54 Correlación entre GMET y Estación BO2074: datos diarios (izquierda); mensuales (derecha)

Estación BO2157

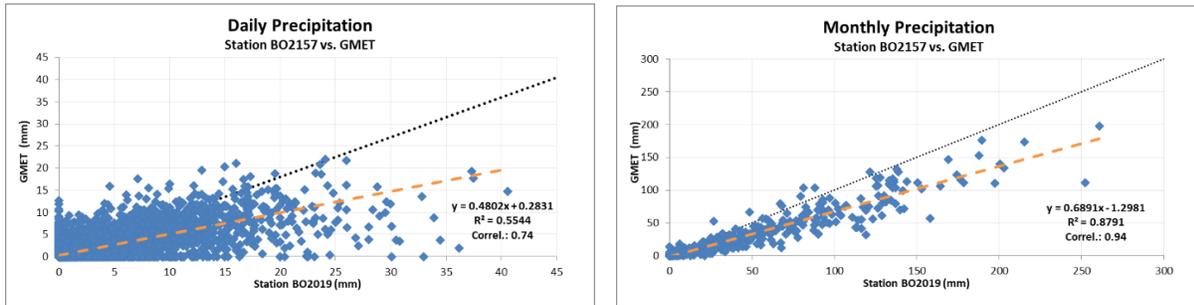


Ilustración 55 Correlación entre GMET y Estación BO2157: datos diarios (izquierda); mensuales (derecha)

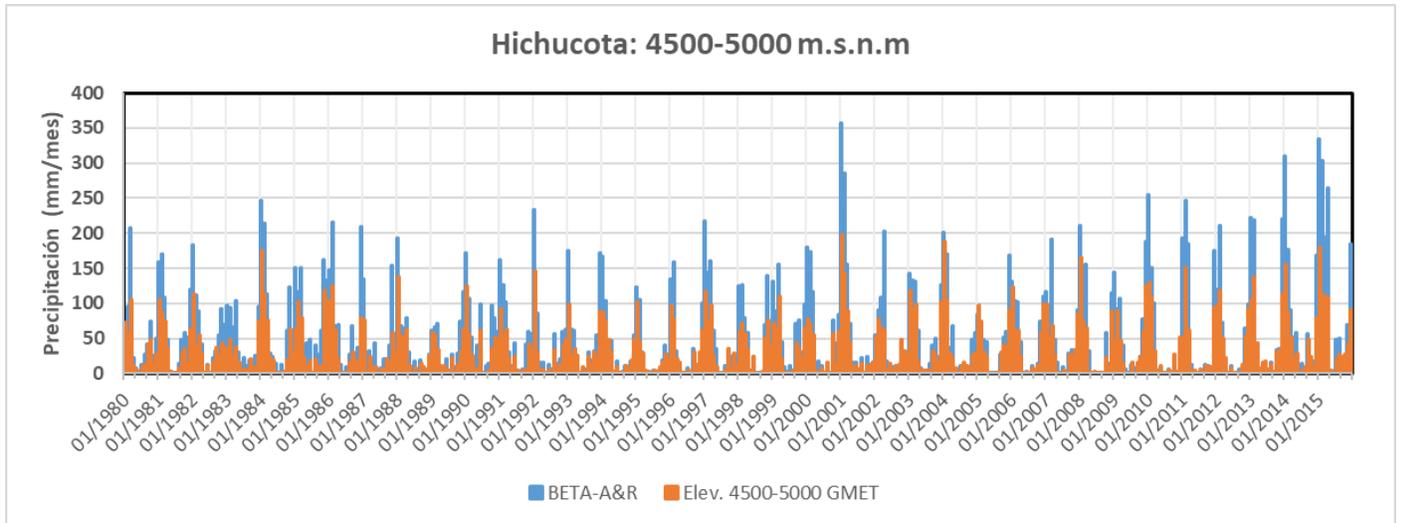


Ilustración 56. Precipitación: modelo BETA-A&R vs GMET, subcuenca Hichu Khota, elevación 4500-5000m

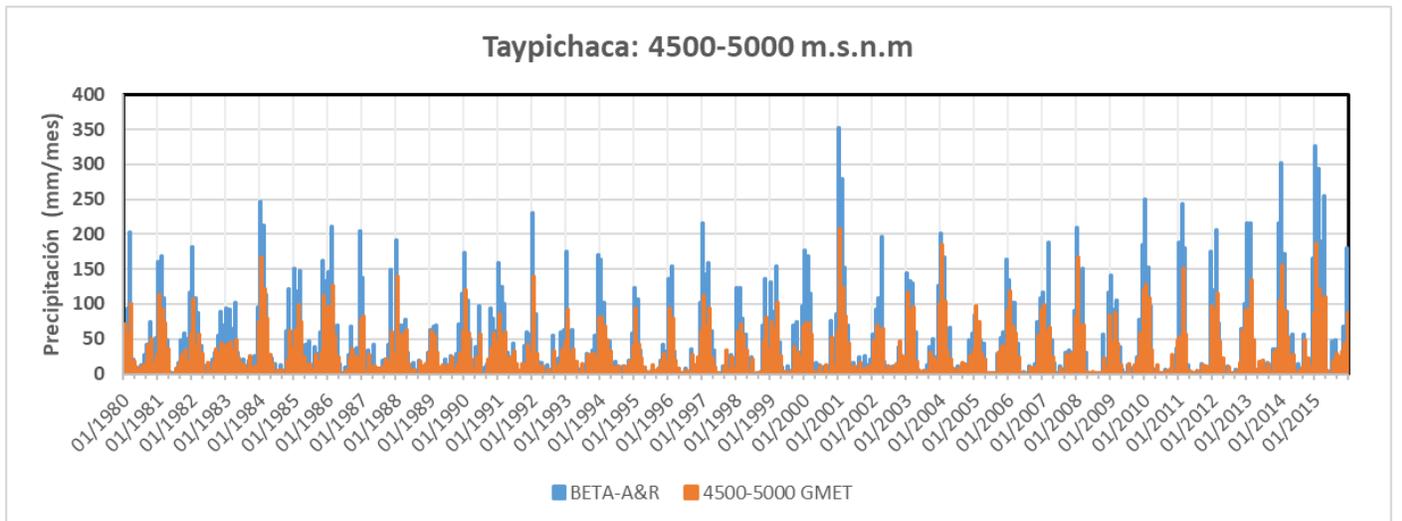


Ilustración 57. Precipitación: modelo BETA-A&R vs GMET, subcuenca Taypi Chaca, elevación 4500-5000

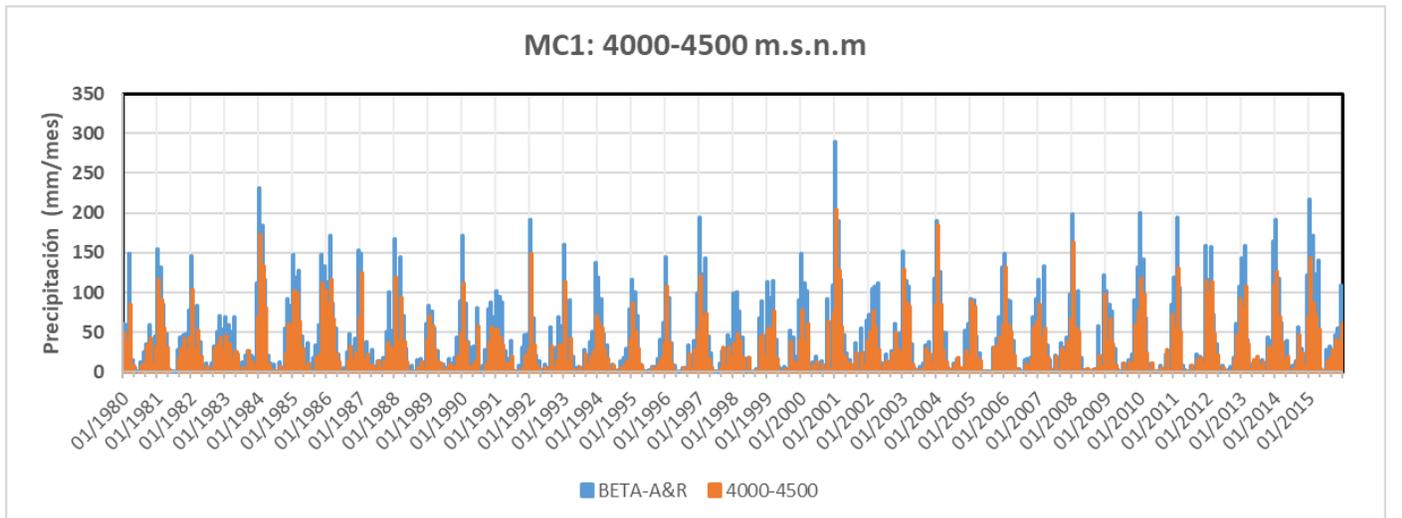


Ilustración 58. Precipitación: modelo BETA-A&R vs GMET, subcuenca MC1, elevación 4000-4500

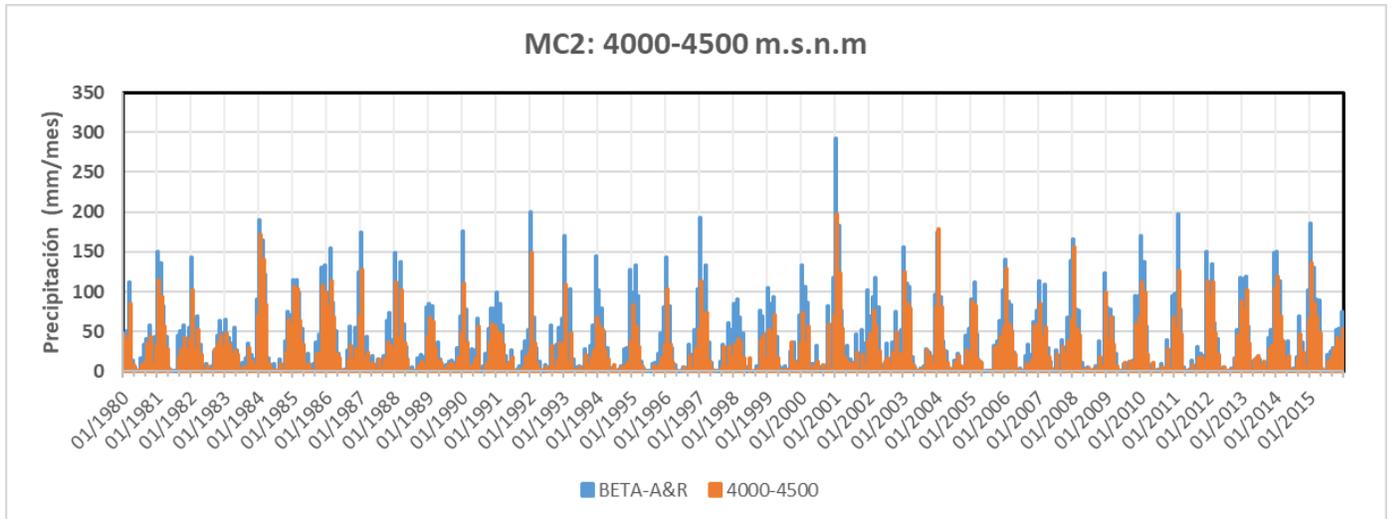


Ilustración 59. Precipitación: modelo BETA-A&R vs GMET, subcuenca MC2, elevación 4000-4500

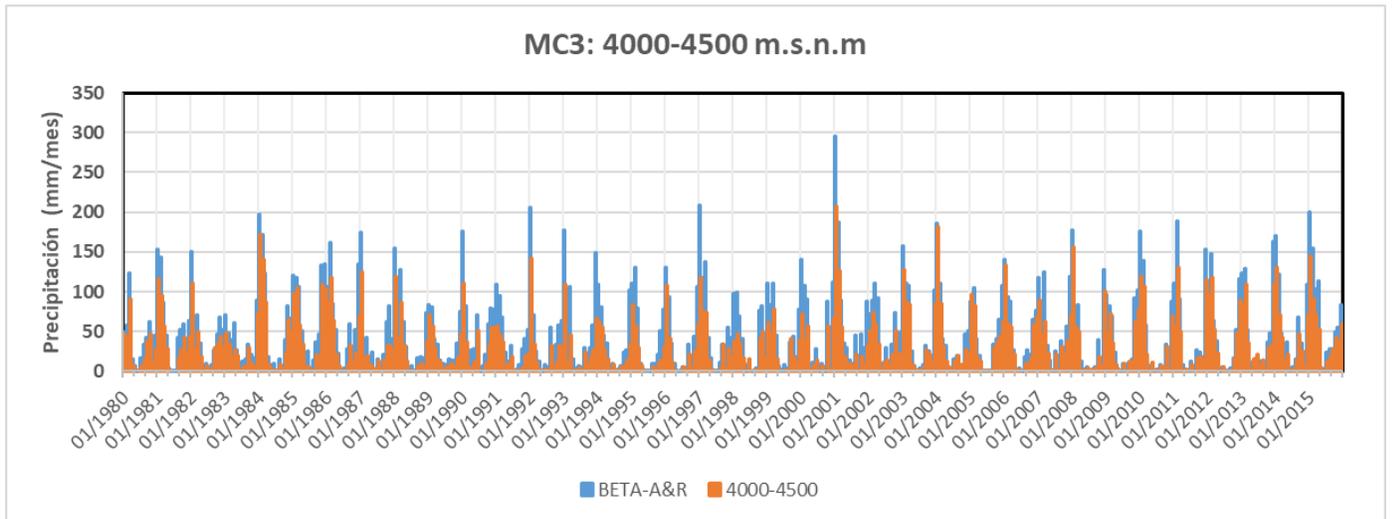


Ilustración 60. Precipitación: modelo BETA-A&R vs GMET, subcuenca MC3, elevación 4000-4500

7.4 Apéndice 4. Resultados preliminares obtenidos por el modelo WEAP

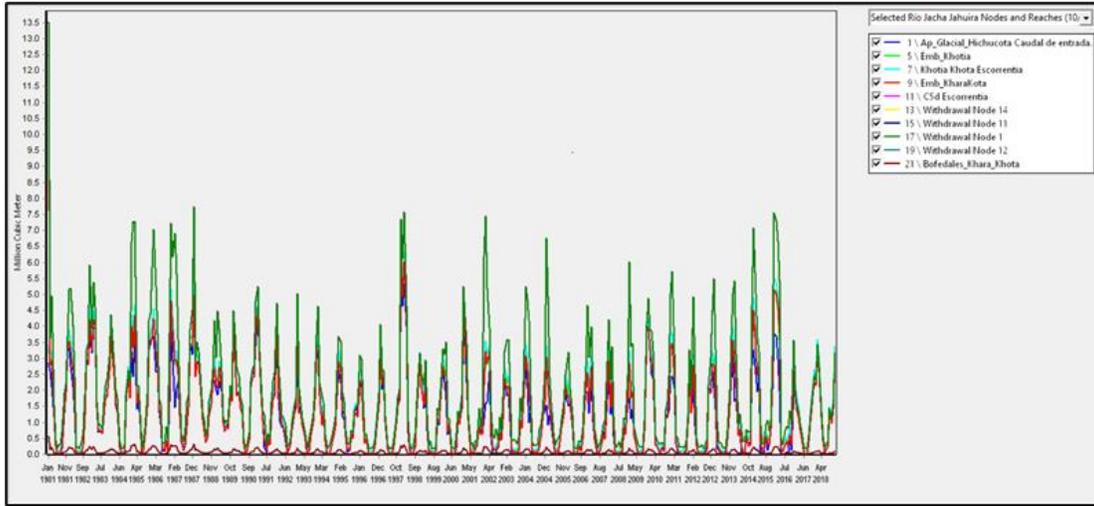


Ilustración 61. Descargas mensuales en el rio Jacha Jahuirá en diferentes secciones

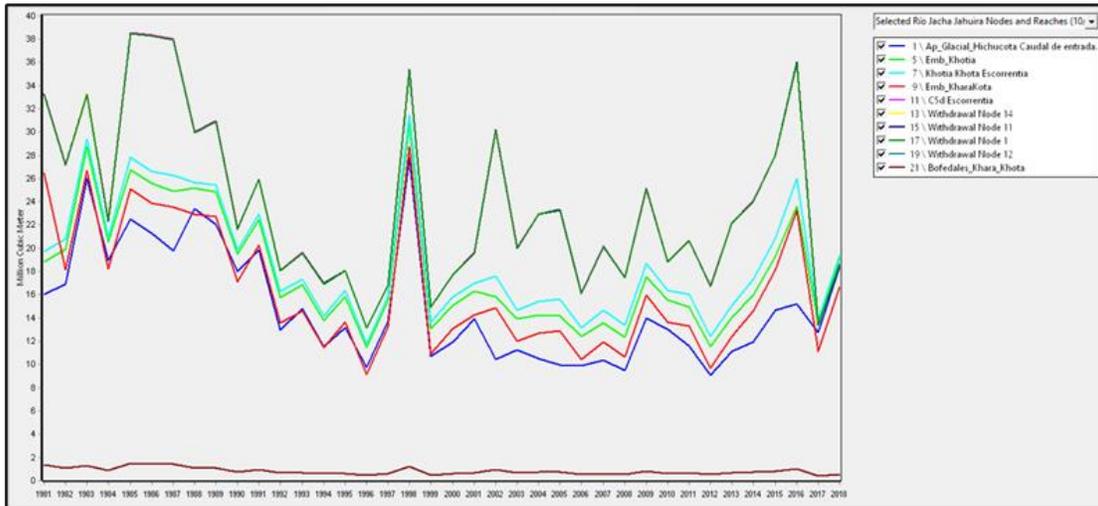


Ilustración 62. Descargas anuales en el rio Jacha Jahuirá en diferentes secciones

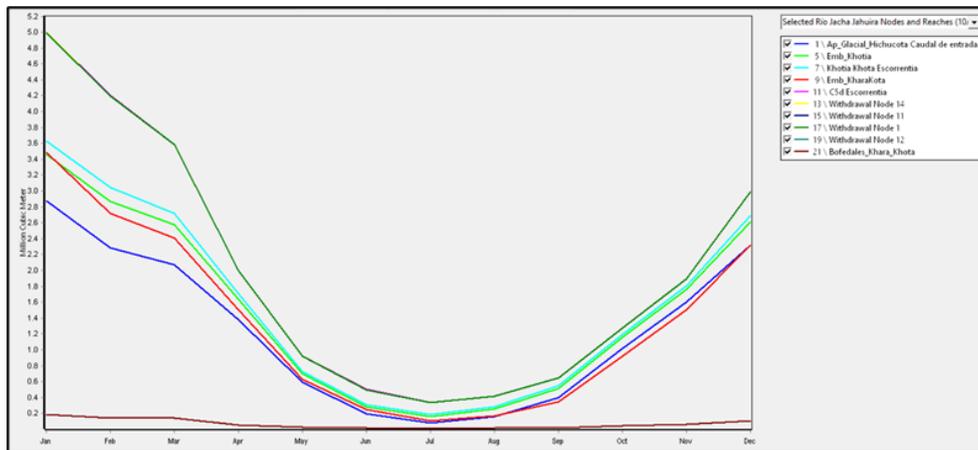


Ilustración 63. Promedio mensual de descargas en el rio Jacha Jahuirá en diferentes secciones

Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

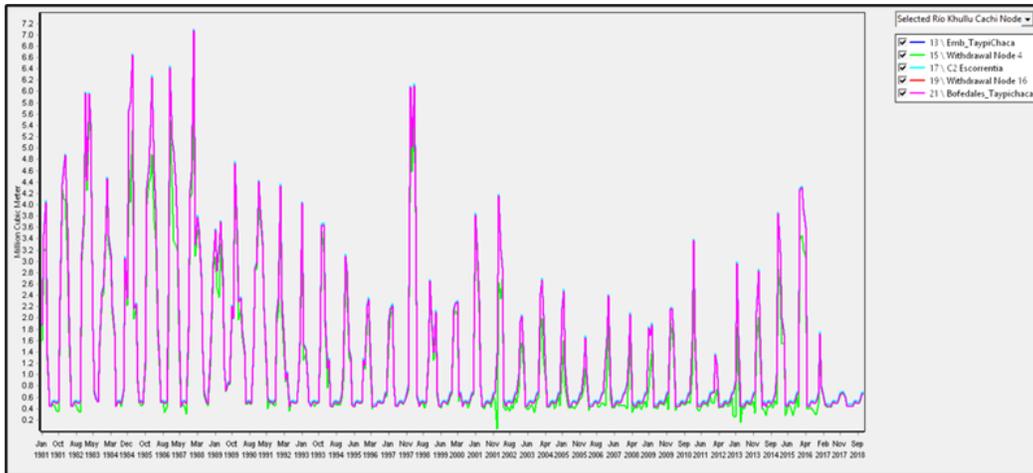


Ilustración 64. Descargas mensuales en el río Khullu Kachi en diferentes secciones

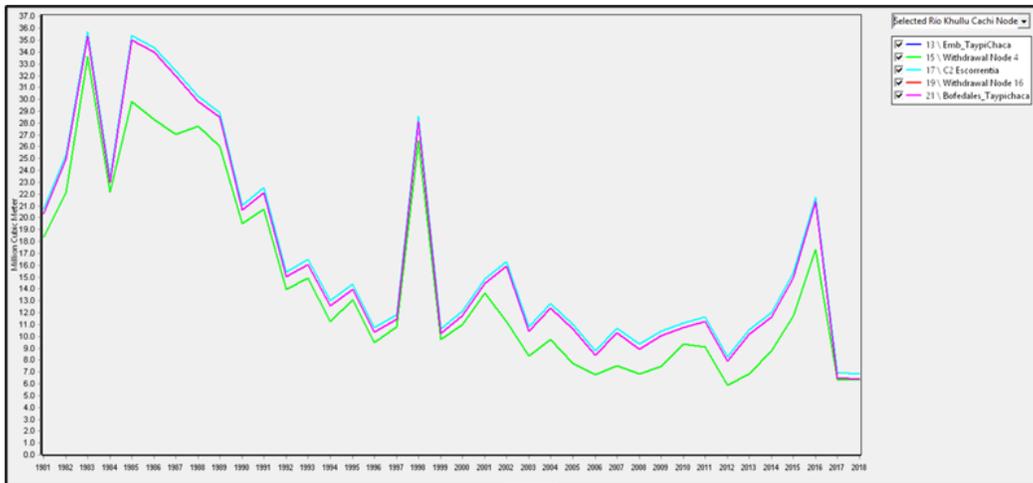


Ilustración 65. Descargas anuales en el río Khullu Kachi en diferentes secciones

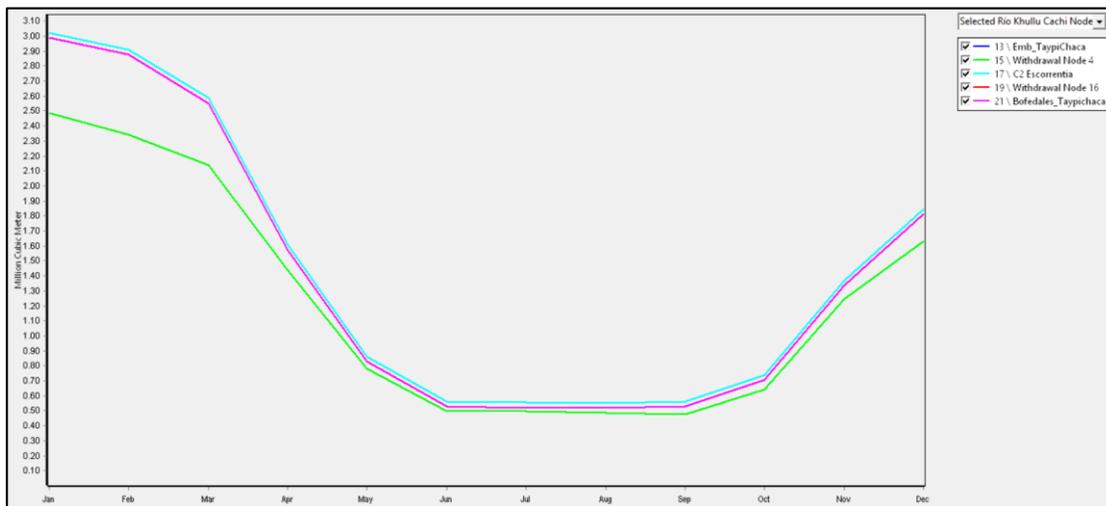


Ilustración 66. Promedio mensual de descargas en el río Khullu Kachi en diferentes secciones

7.5 Apéndice 5. Planillas de visualización de datos

Planillas Tableau, disponibles en línea <https://public.tableau.com/profile/jeanne.fernandez#!/vizhome/BofedalesAltoandinos/Introduccion>

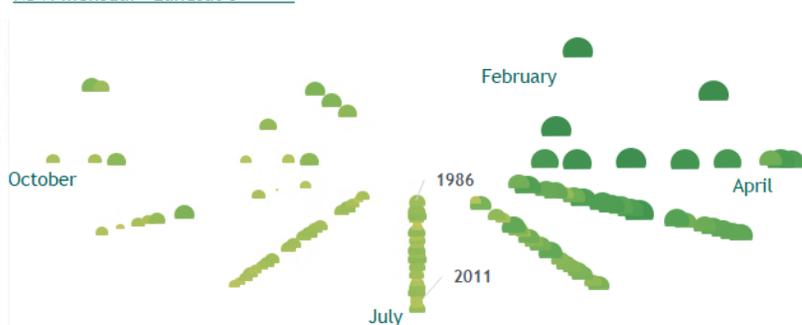
De que color estan los bofedales altoandinos este mes?

- Landsat 5
- Landsat 8

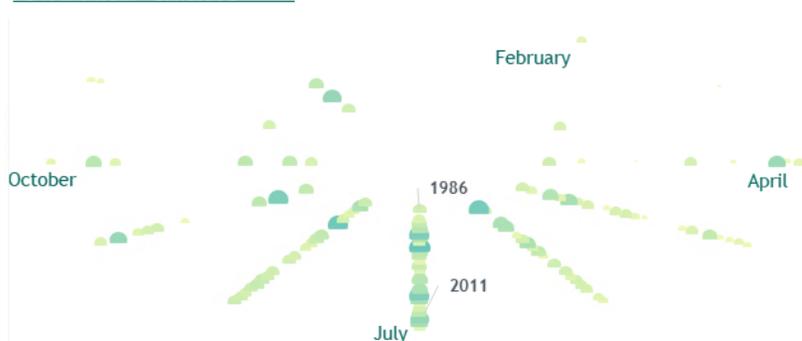


Las **media lunas** representan el valor mensual promedio de los **índices NDVI y MNDWI** para los bofedales altoandinos de la cuenca Katari. Los sensores no son totalmente comparables entonces se puede filtrar: **Landsat 5** (1986-2011) o **Landsat 8** (2013-2020).

NDVI mensual - Landsat 5



NDVI mensual - Landsat 5



NDVI mensual promedio



Se observa **una tendencia ciclica** de los valores NDVI mensuales promedios. El ciclo de valores MNDWI es menos marcado.

El indicador NDVI permite medir la densidad de la **vegetación verde**. Se calcula con la proporción de luz visible e infrarroja absorbida y reflejada por las plantas. Un valor cerca o debajo de **0** significa que **no hay vegetación** y cerca de **+1** indica la **mayor densidad** de hojas verdes.

MNDWI mensual promedio



El índice MNDWI estima el **contenido de agua** de la hoja a nivel del dosel. Un valor cerca de **1** indica la **presencia de agua**, mientras que un valor negativo indica su ausencia.



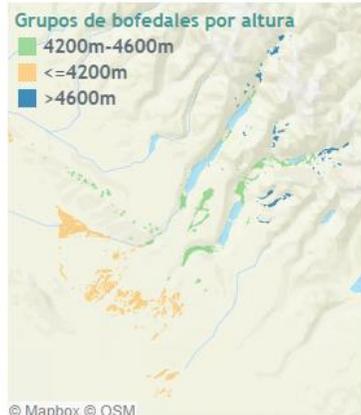
De que color estan los bofedales en las alturas y en los valles?



- Landsat 5
- Landsat 8

Ademas de la tendencia ciclica de los valores NDVI y MNDWI, se observan diferencias en funcion de la altura.

Entre fines de diciembre a junio), los bofedales en las zonas debajo de los 4200m se encuentran mas verdes. Mas arriba de 4600m, los bofedales pueden estar cubiertos de nieve y por esta razon el NDVI promedio es un poco mas bajo.



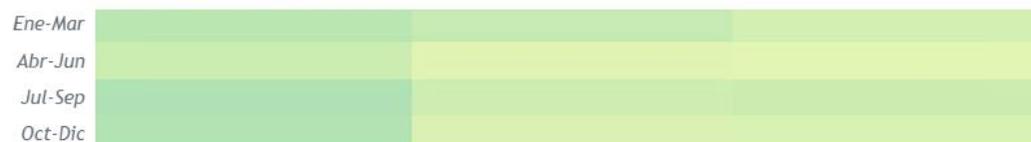
0.20 0.70

Señal NDVI



-0.50 -0.25

Señal MNDWI



0% 1%

% del año inundado

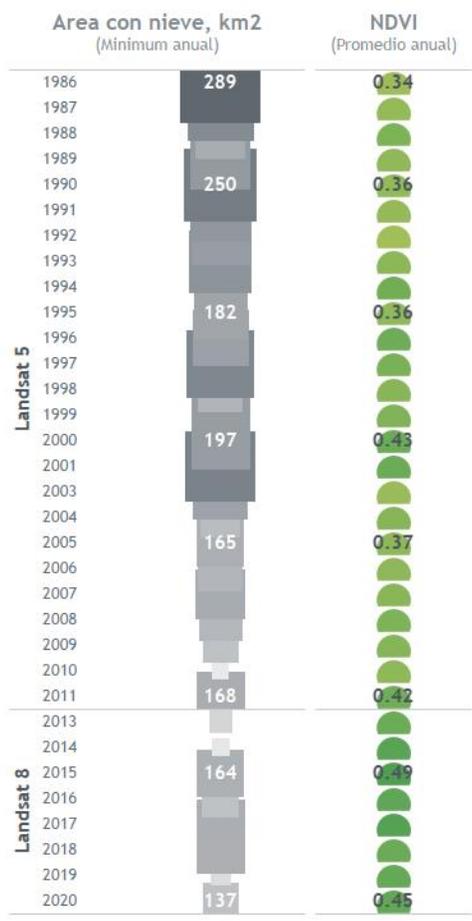
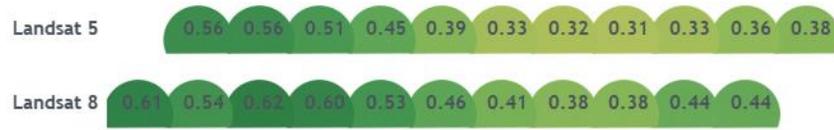
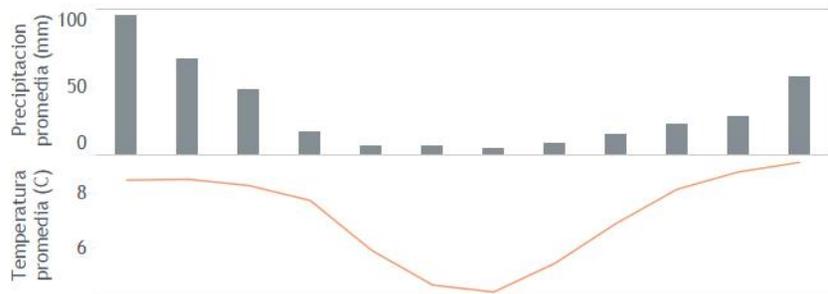


Monitoreo hidro-ecológico y modelación de bofedales de altura en la cuenca Katari

De que color estan los bofedales segun el clima?

A pesar de la falta de datos en la época húmeda, podemos comparar los promedios NDVI mensuales con factores climáticos y proponer la hipótesis siguiente:

Existe una relación entre las variaciones temporales del NDVI y los niveles de precipitación.



Los impactos del cambio climático están visibles en la pérdida de superficie glaciar en la cuenca Katari.

En términos de impacto sobre los ecosistemas, hay indicaciones de que los bofedales todavía siguen siendo verdes y productivos, pero es probable que las consecuencias del cambio climático se hagan visibles a largo plazo:

Dado que la nieve de los glaciares se está derritiendo, esta agua está recargando los acuíferos que abastecen los bofedales. Los bofedales todavía están recibiendo suficiente agua, pero en el futuro podrían ser afectados si la recarga acuífera se reduce.