

ECONOMÍA AMBIENTAL

**Gestión Hidrológica Aplicada y su
Relación con la Biodiversidad Acuifera**

Carlos Moreano Huayhua



Instituto Latinoamericano de Altos Estudios

**Economía ambiental: gestión
hidrológica aplicada y su
relación con la biodiversidad
acuífera**

INSTITUTO
LATINOAMERICANO
DE ALTOS ESTUDIOS

Carlos Moreano Huayhua

[moreanoc21@gmail.com]

orcid [<https://orcid.org/0000-0002-0820-1419>]

Bachiller en Ciencias Agrarias; Magíster Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas; Doctoris Philosophiae en Economía de los Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable. Formulador de proyectos de inversión pública y responsable de estudios hidrológicos en el gobierno regional de Apurímac. Docente de las Universidades de San Antonio Abad del Cusco y Tecnológica de los Andes, regentando cursos sobre manejo de cuencas, hidrología, ingeniería de riegos, diseños experimentales agrícolas. Especialista en Gestión de Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua. Consultor sobre estudios hidrológicos para proyectos hidráulicos; Especialista en Estudios Ambientales y Valoración Económica de Recursos Naturales.

**Economía ambiental: gestión
hidrológica aplicada y su
relación con la biodiversidad
acuífera**

Carlos Moreano Huayhua

INSTITUTO
LATINOAMERICANO
DE ALTOS ESTUDIOS

Queda prohibida la reproducción por cualquier medio físico o digital de toda o una parte de esta obra sin permiso expreso del Instituto Latinoamericano de Altos Estudios –ILAE–.

Publicación sometida a evaluación de pares académicos (*Peer Review Double Blinded*).

Esta publicación está bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento - NoComercial - SinObraDerivada 3.0 Unported License.



ISBN 978-628-7532-52-6

© Carlos Moreano Huayhua, 2022
© Instituto Latinoamericano de Altos Estudios –ILAE–, 2022

Derechos patrimoniales exclusivos de publicación y distribución de la obra
Cra. 18 # 39A-46, Teusaquillo, Bogotá, Colombia
PBX: (571) 601 232-3705
www.ilae.edu.co

Diseño de carátula y composición: Harold Rodríguez Alba
Edición electrónica: Editorial Milla Ltda. (57) 601 323-2181
editorialmilla@telmex.net.co

Foto de cubierta por Harold Rodríguez Alba

Editado en Colombia
Published in Colombia

Contenido

INTRODUCCIÓN	11
<hr/>	
CAPÍTULO PRIMERO	
ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE MODELOS HIDROECONÓMICOS, BIODIVERSIDAD Y SERVICIOS DE ECOSISTEMAS	17
I. Política hidroeconómica en función de modelos hidroeconómicos	17
II. Biodiversidad y servicios ecosistémicos	21
III. Multiespecies y su impacto en los servicios ecosistémicos	24
<hr/>	
CAPÍTULO SEGUNDO	
ANÁLISIS ECONÓMICO EN MATERIA HÍDRICA Y SU INFLUENCIA ECOSISTÉMICA EN LA CUENCA DEL RÍO MARIÑO	29
I. Objetivo	29
II. Objetivos específicos	29
III. Justificación del estudio	30
IV. Métodos y materiales	32
A. Objetivo específico 1: Diagnosticar la oferta hídrica en la cuenca del río Mariño	32
1. Diagnóstico de la oferta hídrica en la cuenca del río Mariño	32
2. Método de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas -CUBHIC-	34
B. Objetivo específico 2. Evaluar la demanda del servicio de agua agrícola y poblacional en la cuenca del río Mariño	57
C. Objetivo específico 3: Realizar el balance hídrico de la cuenca del río Mariño	60
D. Obejtivo específico 4: Calcular el valor económico del agua que favorece la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica en la cuenca Mariño	60

CAPÍTULO TERCERO

ZONAS DE VIDA Y BALANCE HÍDRICO	65
I. Oferta hídrica a nivel de cuencas: río Mariño	65
A. Topología de la cuenca	65
B. Rasgos fisiográficos	66
C. Información hidrométrica-hidrometeorológica	68
1. Variables climatológicas	68
2. Recurso hídrico disponible	69
3. Infiltración de agua (bofedal y pajonal de puna)	77
4. Determinación de la oferta hídrica en ecosistemas	79
5. Demanda de agua en la cuenca del río Mariño	86
6. Balance hídrico	95
7. Servicio ecosistémico de regulación hídrica en la cuenca alta y media del Mariño: potenciales proveedores	98
8. Importancia económica del servicio de provisión hidrológica en la cuenca del río Mariño	105
Conclusiones	111
Recomendaciones	111

CAPÍTULO CUARTO

UNA BREVE MIRADA PANORÁMICA SOBRE LA IMPORTANCIA DEL AGUA Y LOS ECOSISTEMAS	113
--	-----

BIBLIOGRAFÍA	117
---------------------	------------

Índice de tablas

TABLA 1.	Bienes y servicios de los ecosistemas	26
TABLA 2.	Estaciones meteorológicas en la zona de influencia de la cuenca Mariño	68
TABLA 3.	Diversidad de especies en el bofedal de la cuenca Mariño	70
TABLA 4.	Diversidad de especies de pajonal y césped de puna	74
TABLA 5.	Ecosistemas de pajonal y césped de puna (infiltración de agua)	78
TABLA 6.	Oferta hídrica en ecosistema de pastizal (pajonal) de puna en la cuenca del Mariño	80
TABLA 7.	Oferta hídrica en ecosistema de bofedal en la cuenca del Mariño	82
TABLA 8.	Oferta hídrica en ecosistema de bosque nativo en la cuenca del Mariño	84
TABLA 9.	Oferta hídrica total considerando los tres ecosistemas evaluados en la cuenca del Mariño	86
TABLA 10.	Área de cultivo en la cuenca Mariño	88
TABLA 11.	Evapotranspiración potencial en la cuenca del Mariño	89
TABLA 12.	Demanda de agua para riego en la cuenca alta del río Mariño	90
TABLA 13.	Demanda de agua para riego en la cuenca media del río Mariño	91
TABLA 14.	Requerimiento de agua para riego en la cuenca del río Mariño	93
TABLA 15.	Proyección poblacional de la ciudad de Abancay	93
TABLA 16.	Proyección de conexiones totales de agua potable	95
TABLA 17.	Proyección del volumen demandado de agua potable (m ³ /año) en la cuenca del Mariño	95
TABLA 18.	Oferta hídrica en diferentes ecosistemas (m ³ /año)	96
TABLA 19.	Balance oferta demanda de agua para riego en la cuenca alta y media del Mariño (m ³ /año)	96
TABLA 20.	Oferta de agua para uso poblacional en la cuenca del Mariño	97
TABLA 21.	Balance de agua para consumo humano	97
TABLA 22.	Potenciales proveedores del servicio ecosistémico en la cuenca del Mariño	100
TABLA 23.	Régimen de tenencia de la tierra en la cuenca alta y media de Mariño (promedio en ha)	100
TABLA 24.	Superficie de cultivos y porcentaje de uso de suelo en la cuenca del Mariño	101
TABLA 25.	Características productivas en la cuenca Mariño	101
TABLA 26.	Rendimientos productivos en la cuenca alta de Mariño (kg/ha/año) bajo riego	102
TABLA 27.	Rendimientos productivos en la cuenca alta de Mariño (Kg/ha/año) en secano	103
TABLA 28.	Rendimiento económico de la papa en secano en la cuenca del Mariño	104

TABLA 29.	Rendimiento económico de la papa bajo riego en la cuenca del Mariño	104
TABLA 30.	Rendimiento económico del maíz en secano en la cuenca del Mariño	104
TABLA 31.	Rendimiento económico del maíz bajo riego en la cuenca del Mariño	104
TABLA 32.	Ingresos por producción de papa bajo riego en la cuenca del Mariño	105
TABLA 33.	Áreas por ecosistema en la cuenca del Mariño	106
TABLA 34.	Valor de captación de agua	107
TABLA 35.	Valor promedio de captación de agua por la cobertura vegetal de la cuenca Mariño (S/año)	108
TABLA 36.	Ecosistemas de la cuenca Mariño (S/m ³)/valor de restauración	109
TABLA 37.	Valor del agua en la cuenca Mariño S./m ³	110

Índice de figuras

FIGURA 1.	Pérdida de la diversidad y sus posibles consecuencias	25
FIGURA 2.	Proceso metodológico investigativo	33
FIGURA 3.	Cálculo de la evapotranspiración	57
FIGURA 4.	Demarcación de la unidad hidrográfica Mariño	66
FIGURA 5.	Familia de especies en ecosistema de bofedal (cuenca Mariño)	71
FIGURA 6.	Bofedal Allpaccocha	72
FIGURA 7.	Bofedal Rontoccocha	72
FIGURA 8.	<i>Distichia muscoides</i> , especie que permite la interceptación e infiltración del agua	73
FIGURA 9.	<i>Lobelia olygophyla</i> (izq), <i>Cotula mexicana</i> (der)	73
FIGURA 10.	Familia de especies en ecosistema de pajonal y césped de puna	76
FIGURA 11.	Pajonal aledaño a la laguna de Rontoccocha en proceso de degradación	77
FIGURA 12.	<i>Stipa ichu</i> , comunidad de Micaela Bastidas en la cuenca del Mariño	77
FIGURA 13.	Volumen de agua en m ³ /año en ecosistema de pastizal en la cuenca del Mariño	80
FIGURA 14.	Escorrentía en el ecosistema de pastizal	80
FIGURA 15.	Percolación en el ecosistema de pastizal	81
FIGURA 16.	Volumen de agua en m ³ /año en ecosistema de bofedal en la cuenca del Mariño	82
FIGURA 17.	Escorrentía en el ecosistema de bofedal	82
FIGURA 18.	Percolación en el ecosistema de bofedal	83
FIGURA 19.	Volumen de agua en m ³ /año en ecosistema de bosque nativo en la cuenca del Mariño	84
FIGURA 20.	Escorrentía en el ecosistema de bosque nativo	85
FIGURA 21.	Percolación en el ecosistema de bosque nativo	85
FIGURA 22.	Canal Mariño	87
FIGURA 23.	Curvas de crecimiento poblacional en la ciudad de Abancay, 2018	94
FIGURA 24.	Balace de agua para consumo humano	98
FIGURA 25.	Mapa de cobertura vegetal en la cuenca del Mariño, 2018	99

Introducción

Para entender mejor el tema, es menester saber qué es en realidad una *cuenca hidrográfica*. Esta hace alusión a un sistema natural de drenaje de agua, o bien a una depresión en la superficie, la cual varía según las pendientes que la rodean. En ella se almacena el agua que proviene de las precipitaciones o durante el deshielo. El caudal de dicho recurso termina desembocando en los ríos, lagunas u océanos.

Así mismo, las cuencas hidrográficas se estructuran en *cuenca alta*, área donde nace la corriente de los ríos que fluyen por un canal o pendiente determinados; *cuenca media*, se describe como la presencia de valles de los ríos, donde se avistan materiales sólidos desplazados por la corriente; y *cuenca baja*, o área baja del río, donde dichos materiales se depositan y, luego, tienden a convertirse en llanuras.

Las cuencas hidrográficas son de vital relevancia, porque favorece el flujo de agua, evitando a su vez el riesgo de factores contaminantes que alteren la zona como inundaciones, además de normalizar la calidad y fuentes de agua dulce, lo cual representa la biodiversidad total del globo terráqueo. Así mismo, la velocidad con que fluyen sus aguas repercute en la obtención de energía hidroeléctrica.

Si bien es cierto, las cuencas hidrográficas cumplen un rol importante en el ciclo del agua, es decir, parte de este recurso se evapora, otra inicia un proceso de absorción y otra tiende a diversificarse en los diferentes canales y acuíferos ecosistémicos. También es necesario recordar que, para que una cuenca se mantenga estable y rinda buenos frutos a la postre en materia hídrica, se debe proteger a conciencia el estado vegetativo de las diversas zonas de vida, como los árboles, las plantas, así como las diversas especies vegetales que las rodean.

En la actualidad, el desgaste del suelo es uno de los problemas más recientes en la cuenca del río Mariño, debido al sobrepastoreo y otras actividades que afectan en exceso las áreas verdes, que poseen gran variedad de especies vegetales que favorecen la irrigación e infiltración del agua. Existen tres ecosistemas de fuste que revelan mejor lo que se pretende solucionar y mantener en óptimas condiciones. Así, tenemos los pastizales o pajonales de puna, bofedales y bosques nativos, territorios donde diversas especies abundan a sus anchas: *stipa ichu*, *distichia muscoides* y *polylepis racemosa*, entre otras.

Así mismo, tenemos otras comunidades de organismos como las costras biológicas (*biocrusts*), que aseguran una regulación acuífera idónea a través del flujo captado de agua, reducción de la escorrentía, así como un proceso de infiltración y percolación hídrica hacia el subsuelo, ofreciendo una oferta sustanciosa de agua en fuentes hídricas, tales como manantiales, venaje, etc. hallados en la cuenca media.

En la provincia de Abancay (Apurímac, Perú) se encuentra la unidad hidrográfica de Mariño Perú, con un área de 244 km² y una altitud de 2444m, y aproximadamente 72 277 pobladores de los distritos de Abancay y Tamburco hacen uso del agua para diferentes actividades domésticas¹. En ese contexto se valoraron los flujos hidrológicos y biodiversidad funcional vinculada a los recursos hídricos.

La producción agrícola es una de las principales labores que se realizan en dicha cuenca para comercializar o abastecer a la región. Es necesario contar con enormes volúmenes de agua en su fase de producción. Cabe mencionar que la oferta hídrica se constituye a través de la precipitación de la cuenca y el cúmulo de agua que proviene de la laguna Rontoccocha y otras fuentes aledañas.

En época de estiaje, dichas fuentes de agua disminuyen de forma significativa, por lo que la demanda se ve perjudicada debido a la escasez generada, lo cual trae consigo numerosos conflictos en la zona. La Empresa Municipal de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado de Abancay -EMUSAP- abastece de este recurso de manera permanente a los usuarios que residen en las zonas urbanizadas, donde pagan una tarifa diferenciada según su consumo. Por otro lado, las Juntas Administradoras de Servicio de Saneamiento -JASS- abastecen a los pobladores de la zona rural, donde realizan un consumo muchas veces desmedido, pese al pago módico de una sola tarifa mensual.

Si bien es cierto existen problemas en el servicio de abastecimiento hídrico en periodos de sequía, en la cuenca del río Mariño se hallan seis fuentes de agua que aseguran el consumo habitual de los lugareños. Tales fuentes son el manantial Marca con un caudal de 75 l/s y la laguna de Rontoccocha con un caudal de 80 l/s, siendo la oferta total de agua para consumo humano de 150 l/s.

Los pobladores de la cuenca del río Mariño consumen un caudal alrededor de 148,50 l/s, el cual sobrepasa los volúmenes que ofrece la oferta hídrica, es decir, existe un valor deficitario de agua de 45 l/s como consecuencia del estiaje en los meses de julio a noviembre, por lo que se procede a racionalizar el agua a determinados sectores demográficos (ciudad de Abancay).

Existe una comisión de usuarios del canal Mariño (capacidad de conducción de 1.000 l/s, resultado del incremento demográfico) y Pachachaca en dicha cuenca. Son 1.600 pobladores del sector agrario y un área bajo riego de 2.200 ha.

Es menester indicar que existe un serio problema en detrimento de la cobertura vegetal, así como la producción de un sinnúmero de actividades exógenas que afectan de forma negativa el normal funcionamiento de los ecosistemas de agua en las cabeceras de la cuenca del río Mariño: tala de árboles, deforestación,

1 INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA. *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*, Lima, INEI, 2018, disponible en: [<http://censo2017.inei.gob.pe/poblacion-del-departamento-de-apurimac-totalizo-405-mil-759-personas-al-2017/>].

calcinación de pajonales, etc. que perjudican seriamente la superficie terrestre, producen escorrentía en épocas de precipitación y una infiltración cada vez más reducida, una recarga pobre de acuíferos, etc. lo que repercute en una escasez de agua suministrada por los lugareños de la cuenca media y baja².

Hay una variación manipulada de la superficie y uso de tierra en los Andes con fines de aperturas ambientales³, lo cual genera por ende una conversión y degradación paulatina de la misma, ello causa una inestabilidad funcional a largo plazo⁴.

Por otro lado, existen parcelas instaladas que varían de tamaño (1 m² a 1 ha) para el seguimiento respectivo de la diversidad filogenética en el nevado de Santa Isabel⁵ y en las cumbres del páramo (Parque Nacional Cocuy)⁶, o las parcelas en bosques andinos que se hallan en Colombia, que tienen por finalidad regular los procesos acuíferos y conservar la cobertura vegetal⁷. Existen también programas como el Santuario Iguaque en Colombia, en ese lugar se realiza un seguimiento a los componentes críticos de la biodiversidad, como la diversidad microbiana del suelo⁸.

Hay variedad de ecosistemas altoandinos donde tienen un papel importante el clima y el uso variado de la tierra, recursos renovables con los que se benefi-

-
- 2 PRODERN. *Mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos*. Lima, 2018.
 - 3 ALEJANDRO DEBB. *Estimación de cambios en la respuesta hidrológica*, Bogotá, DNP-PAFC-BID, 1992.
 - 4 WILLIAM M. DENEVAN. *Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes*, Oxford, Oxford University Press, 2001.
 - 5 IVÁN CUELLAR. *Fitocolonización en la zona periglaciaria del glaciar Conejeras, en el volcán Nevado de Santa Isabel-Proyecto Piloto*. Bogotá, IDEAM, 2017.
 - 6 FRANCISCO CUESTA, PRISCILLA MURIEL, LUIS DANIEL LLAMBÍ, STEPHAN HALLOY, NIKOLAY AGUIRRE, STEPHAN BECK, JULIETA CARRILLA, ROSA ISELA MENESES, SOLEDAD CUELLO, ALFREDO GRAU, LUIS E. GÁMEZ, JAVIER IRAZÁBAL, JORGE JÁCOME, RICARDO JARAMILLO, LIREY RAMÍREZ, NATALIA SAMANIEGO, DAVID SUÁREZ, NATALI THOMPSON, ALFREDO TUPAYACHI, PAUL VIÑAS, KARINA YAGER, MARÍA T. BECERRA, HARALD PAULI y WILLIAM D. GOSLING. "Latitudinal and altitudinal patterns of plant community diversity on mountain summits across the tropical Andes", *Ecography*, 40, n.º 12, 2017, pp. 1381 a 1394, disponible en [<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ecog.02567>].
 - 7 ÁLVARO DUQUE, PABLO R. STEVENSON y KENNETH J. FELEBY. "Thermophilization of adult and juvenile tree communities in the northern tropical Andes", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, n.º 34, 2015, pp. 10.744 a 10.749, disponible en [<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1506570112>].
 - 8 NAKUL CHETTRI, EHSAN DULLOO, ANDREW HENDRY, BARDUKH GABRIELIAN, JULIAN GUTT, UTE JACOB, EMRE KESKIN, AIDIN NIAMIR y BAYRAM ÖZTÜRK. "Status and trends – nature", en INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES (ed.). *The Global Assessment of Biodiversity and Ecosystem Services*, París, IPBES, 2019.

cian algunas empresas con fines particulares. Estos ecosistemas producen gran cantidad de carbono, agua destinada para las áreas rurales y urbanas⁹.

Hay labores comunales que favorecen el mantenimiento de las cabeceras de la cuenca, como la clausura de praderas altoandinas, que tiene la función capital de recuperar la superficie vegetal, la rotación de potreros que supervisan el pastoreo, la conservación de lagunas y bofedales donde se infiltra agua y se produce una buena recarga acuífera.

En el Perú no se cuenta con información acerca de la relación existente entre la cobertura vegetal, la infiltración de agua y su acumulación, tampoco se sabe nada con respecto a la biodiversidad funcional (donde abundan diversas especies vegetales y cianobacterias como los *biocrusts*) y su relación con los procesos de infiltración acuífera.

Los flujos hidrológicos y los recursos hídricos de la cuenca del río Mariño tienen un valor económico, ya que generan caudales en tres ecosistemas: pastizal, bofedal y forestación nativa. Es importante saber cuán significativo es el vínculo entre la cobertura vegetal, llamada también diversidad funcional y los procesos de infiltración de agua, lo que genera a su vez una recarga del acuífero para, luego, obtener este elemental recurso en fuentes hídricas (lagunas, manantiales, ríos y quebradas). De igual modo, se valora sobremanera el agua porque el objetivo es conocer qué ecosistema es más productivo en razón del almacenamiento de este recurso, así como evaluar si las actividades de conservación-recuperación vegetativa y obtención de caudales son redituables en términos pecuniarios.

Por otro lado, la cuenca Mariño se caracteriza por poseer bosques nativos, los cuales son puntos vulnerables ante la intervención del hombre y sus actividades en las áreas de agricultura, ganadería, pecuaria o urbanas. Así mismo, las aguas residuales de los distritos de Abancay y Tamburco propician la degradación del río, lo cual es otro factor adverso para los ecosistemas, en cuyas zonas habría que evaluar. El agua tiene múltiples usos, máxime, en los sembríos y cultivos anuales en el valle Pachachaca (parte baja de la cuenca), razón por la cual el agua tiende a desviarse mediante canales de riego. Recordemos que dicha actividad requiere enormes cantidades de agua, ante lo cual se hace necesario ladear el cauce de los ríos, pero también provoca su sequedad, afectando a dicho valle, lo que es aún más contraproducente en época de estiaje, reduciendo el caudal y propiciando serios cambios biológicos y físicos, por ejemplo, en los bosques de ribera y las áreas acuáticas.

En la actualidad, la ciudad de Abancay, donde se ubica la cuenca Mariño, presenta un aumento demográfico afectado por las constantes lluvias, al punto de causar distintos fenómenos geohidrológicos. Numerosos estudios han demostrado que casi la totalidad de la cuenca es vulnerable por su accidentada topografía, movimientos en masa reactivados por la infiltración hídrica y flujos subsuperficiales en periodos pluviales, así mismo, por la elevada meteorización del terreno donde se forman cavidades. Pese a ello, las aguas subterráneas cumplen un rol clave en la reestructuración de los procesos hídricos, esto sucede mayormente en las calizas de la cuenca, que se caracterizan por presentar capas fracturadas y permeables que sirven como acuíferos potenciales.

En efecto, la lluvia es determinante para generar mayor disponibilidad de agua en los reservorios, por lo que es muy importante tener un conocimiento previo del clima en esa región para entender la frecuencia y magnitud de los procesos, no obstante, los registros en dicha zona no son suficientes para predecir la relación de precipitaciones y eventos que como fuente primaria del agua. Resulta muy complicado.

La cuenca del río Mariño es una zona de vida que tiende al incremento demográfico, donde ciertamente hay mayor flujo y reflujo acuífero para fines agrícolas y consumo humano. En la parte alta se realizan actividades antrópicas que contravienen en funcionamiento natural de los ecosistemas, muchas veces a favor de las grandes industrias para sus intereses particulares. Por ello, es menester conservar las zonas de recarga hídrica, a través de un proceso de valoración de los fluidos hídricos y, claro está, proteger su biodiversidad.

CAPÍTULO PRIMERO

Aspectos teóricos sobre modelos hidroeconómicos, biodiversidad y servicios de ecosistemas

I. POLÍTICA HIDROECONÓMICA EN FUNCIÓN DE MODELOS HIDROECONÓMICOS

Es importante recalcar que las cuencas hidrográficas son espacios naturales insustituibles para la supervivencia de los recursos renovables y demás procesos socioecológicos que forman parte. Por ello, se debe entender que, conservar tales cuencas, implica incorporar procesos de planeación, implementación y análisis de acciones a través de la intervención de instituciones, el Estado y su *statu quo* y la gente debidamente informados y organizados.

Gestionar los recursos hídricos, implica el cálculo del impacto económico y tomar medidas pertinentes que concienticen su economía para su correcto suministro. Por ello, es necesario identificar los modelos hidroeconómicos, los cuales tienen una relación directa con el tiempo-espacio, y es que se ajustan a determinados elementos como infraestructura, sistemas que regulan los recursos hídricos, ordenamiento e indicadores económicos.

Existe una gestión previa para la provisión del agua, como herramienta de la hidroeconomía, dentro de un contexto socioeconómico. Y es que este recurso tiene un valor monetario que impulsa a los demás sectores e instituciones a realizar una mejor gestión y política al respecto. La cuantía de agua se mide de acuerdo con la utilizada en los distintos contextos y/o pobladores que la demandan, no obstante, tiene un valor económico diferencial¹⁰.

Los modelos hidroeconómicos se emplean para gestionar las diversas opciones asociadas a los recursos hídricos, pues tienen el propósito de maximizar el valor de uso de agua y minimizar los problemas que se originan por la misma razón¹¹. De igual manera, permiten evaluar los conflictos que se originan al gestionar el agua, tomando en cuenta la intervención de la ingeniería, la economía y el medio ambiente. Ello tiene un efecto benéfico que ayuda a tomar mejores decisiones al momento de gestionar un recurso de tamaño magnitud como es el agua. La ventaja fundamental que tienen estos modelos, es que permite realizar cálculos de distribución en tiempo y espacio de los beneficios económicos que trae consigo el agua y sus fines pertinentes.

Como se sabe, los modelos hidroeconómicos se vinculan con varios aspectos que forman parte de su creación: escala hidrológica a nivel de regiones, la intervención de la ingeniería, el entorno ecológico y la razón de ser de su economía en materia de recursos hídricos. Los conceptos económicos son importantes para los modelos de gestión acuífera. Estos modelos emergen como instrumentos necesarios para la gestión integrada de los recursos hídricos -GIRH⁻¹².

-
- 10 JULIEN J. HAROU, MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ, DAVID E. ROSENBERG, JOSUÉ MEDELLÍN AZUARA, JAY R. LUND y RICHARD E. HOWITT. "Hydro-economic models: concepts, design, applications, and future prospects", *Journal of Hydrology*, vol. 375, n.os 3 y 4, 2009, pp. 627 a 643, disponible en [<https://watershed.ucdavis.edu/shed/lund/papers/JulienHydroEcon2009.pdf>].
- 11 ANDREA MOMBLANCH, JEFFERY D. CONNOR, NEVILLE D. CROSSMAN, JAVIER PAREDES ARQUIOLA y JOAQUÍN ANDREU. "Using ecosystem services to represent the environment in hydro-economic models", *Journal of Hydrology*, vol. 538, 2016, pp. 293 a 303.
- 12 GLOBAL WATER PARTNERSHIP. "Integrated water resources management", *TAC Background Paper*, n.º 4, Estocolmo, Global Water Partnership, 2000, disponible en [<https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/04-integrated-water-resources-management-2000-english.pdf>].

Así mismo, dichos modelos están enfocados a la solución y descubrimiento de novedosas estrategias que faciliten con eficiencia y transparencia la utilidad del agua. Por lo que es de suma importancia diseñar un sistema que contribuya a la investigación visceral de nuevas políticas basadas en el mantenimiento de este preciado recurso.

Por otro lado, la presencia del ingeniero agrónomo cobra mucha relevancia al momento de analizar el proceso de abastecimiento de agua y todo lo que conlleva: alcantarillado, transporte, almacenamiento, drenaje, reutilización de aguas residuales, así como las diversas necesidades que demandan del agua¹³. Y es que el mayor porcentaje del uso del agua está destinado a la agricultura, debido en principio al periodo de sequía que golpea a los ecosistemas, razón por la cual los ingenieros agrónomos hoy en día priorizan a rajatabla la labor de diseñar y explotar los regadíos para el correcto funcionamiento de los ecosistemas y sus respectivos beneficios. Es imprescindible el rol que cumplen los ingenieros agrónomos, ya que son los responsables directos para la sostenibilidad de los regadíos, la producción de alimentos y, por consiguiente, velar por el mantenimiento y uso de los recursos hídricos.

Cabe mencionar que, para gestionar el agua, hay que considerar diversos aspectos prioritarios, como tener acceso y derecho de aguas, tomar en cuenta las proyecciones demográficas, su consumo para fines agrícolas o industriales, su suministro en función de la economía, que depende de la cantidad que se genere y los fines de los usuarios¹⁴.

En la actualidad existe un consumo desmedido del agua, debido a la demanda excesiva que generan los trabajos agrícolas y el consumo humano, esto ha hecho que se produzca también un deterioro de los ecosistemas como los humedales en las cuencas.

Los modelos hidroeconómicos tienen una función de vital importancia, porque son aplicados en el diseño de políticas públicas con el fin de integrar los distintos recursos hídricos naturales-superficiales

-
- 13 ALAN RANDALL. "Property entitlements and pricing policies for a maturing water economy", *The Australian Journal of Agricultural Economics*, vol. 25, n.º 3, 1981, pp. 195 a 220, disponible en [<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1467-8489.1981.tb00398.x>].
- 14 BRENDAN FISHER, R. KERRY TURNER y PAUL MORLING. "Defining and classifying ecosystem services for decision making", *Ecological Economics*, vol. 68, n.º 3, 2009, pp. 643 a 653.

y ecosistemas en consonancia con el uso adecuado de la tierra, sin afectar las actividades de los pobladores¹⁵.

VARELA *et al.* sostienen que los modelos hidroeconómicos permiten predecir la oferta hídrica, los resultados de dichas políticas a nivel de parcelas y cuencas¹⁶.

Por ejemplo, el modelo de redes bayesianas evalúa los impactos biofísicos, hidrológicos y económicos de gestión de las cuencas hidrográficas¹⁷. Un modelo hidroeconómico permite evaluar los problemas de gestión hídrica, tomando en cuenta la relación entre ingeniería, economía y medioambiente, así mismo, brinda resultados de vital importancia para poder decidir en una zona tan compleja como la del agua¹⁸.

Tal modelo puede fusionarse con otro hidrogeológico, a efectos de representar de manera conceptual la mejora de calidad de las aguas subterráneas, incluyendo elementos agronómicos para prever y analizar la inversión necesaria, si el proyecto tendrá una resultante benéfica mediante la introducción de esquemas de agricultura y medioambiente.

Los modelos hidroeconómicos están relacionados con el entorno ambiental, y es que se toma la iniciativa de monitorear los valores hídricos, ya que estos son irregulares la mayoría de las veces. Son impredecibles los resultados que pueden arrojar, por lo que no se toma en cuenta de manera sistemática tales valores o cómo debieran ser evaluados con exactitud. Los servicios ecosistémicos brindan un enfoque

-
- 15 MOHAMED TAHER KAHIL, JOSÉ ALBIAC, ARIEL DINAR, ELENA CALVO, ENCARNA ESTEBAN, LORENZO AVELLA y MARTA GARCÍA MOLLA. "Improving the performance of water policies: evidence from drought in Spain", *Water*, vol. 8, n.º 34, 2016, pp. 1 a 15, disponible en [<https://www.mdpi.com/2073-4441/8/2/34/html>].
 - 16 CONSUELO VARELA ORTEGA, IRENE BLANCO GUTIÉRREZ, CHRISTOPHER H. SWARTZ y THOMAS E. DOWNING. "Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: an integrated hydro-economic modeling framework", *Global Environmental Change*, vol. 21, n.º 2, 2011, pp. 604 a 619.
 - 17 MARIT ELLEN KRAGT, DAVID J. PANNELL, ALISTAIR STOTT, ALISTAIR MC-VITTIE, BOUDA VOSOUGH AHMADI y P. WILSON. "Improving interdisciplinary collaboration in bio-economic modelling for agricultural systems", *Agricultural Systems*, vol. 143, 2016, pp. 217 a 224.
 - 18 CLAUS DAVIDSEN, SUXIA LIU, XINGGUO MO, PETER E. HOLM, STEFAN TRAPP, DAN ROSBJERG y PETER BAUER GOTTHEIN. "Hydroeconomic optimization of reservoir management under downstream water quality constraints", *Journal of Hydrology*, vol. 529, 2015, pp. 1.679 a 1.689.

sistemático para reconocer la gama completa de costos-beneficios del medioambiente.

Cada vez son más rigurosos los procedimientos a través de los modelos hidroeconómicos para determinar el correcto funcionamiento ecológico, dada la incertidumbre y los límites que se generan por diversos factores: climáticos, físicos, ambientales, económicos, etc.

II. BIODIVERSIDAD Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Es importante formularnos la siguiente pregunta para tener un concepto más amplio del presente apartado, ¿qué entendemos por biodiversidad? La biodiversidad, o conocida también como *diversidad biológica*, es la vida natural en su máxima expresión, la cual es sometida a varios niveles de organización biológica. Y es que alberga una multitud de organismos y especies determinados por la función que cumplen y la genética que les caracteriza, así como sus procesos evolutivos y ecológicos, según las regiones o zonas de vida donde se encuentren los ecosistemas.

En el Perú la biodiversidad es uno de los pilares fundamentales de la economía nacional. A saber, más del 90% de la actividad de pesca depende de los recursos hidrobiológicos; el 67% del sector agrario se somete a recursos genéticos nativos; el 95% proviene de la actividad ganadera, en la que se identifican los pastos naturales de las diferentes regiones y el 99% de la industria forestal recurre a bosques y especies nativas.

La variabilidad de organismos vivos que existe en cualquier ecosistema (terrestre o acuático) es lo que se denomina biodiversidad, los beneficios que aporta a las comunidades rurales o urbanas. En esa línea, se organizan según las diferentes especies que cohabitan, por ejemplo, la del genoma, que permite identificar personas entre comunidades de la misma especie, especies de la misma comunidad o comunidades paisajistas, donde se les vincula con los servicios ecosistémicos a fin de ser evaluados¹⁹.

Como se sabe, las especies y organismos contribuyen sobre manera en el funcionamiento del ecosistema, como otras que pueden solo ser complementarias a la misma causa, sin embargo, existen mecanismos que pueden surtir efectos benéficos o contraproducentes en el entorno ambiental.

La biodiversidad en los ecosistemas puede contribuir con los distintos elementos que constituyen el ciclo hídrico. En realidad, se sabe muy poco al respecto. En efecto, la gran variedad de plantas existentes tienen una función relevante en la evapotranspiración, escorrentía superficial y subterránea, porque forman parte de una diversidad funcional y estructural²⁰.

La complejidad de la biodiversidad se manifiesta en diversos ecosistemas que aportan múltiples beneficios al ser humano. Pese al sinnúmero de investigaciones realizadas a este respecto, la biodiversidad sigue siendo un tema de fuste en su valoración económica²¹.

La idea central de toda evaluación hacia la biodiversidad debe extraerse de su actividad funcional en pro del bienestar de un colectivo, región o país, muchas veces de manera indirecta o en múltiples formas. Sabemos que ella tiene una fuerte influencia en el entorno medioambiental, sobre todo porque es la que mantiene estable gran variedad de ecosistemas. Pero de esto se sabe muy poco o nada, debido a que el individuo común no se encuentra familiarizado con el concepto que encierra.

La superficie diversa del suelo va a depender de muchos factores asociados, por ejemplo, las *biocrusts* o costras biológicas que conforman “la piel viva de la tierra”, e influye de forma directa en la prestación de servicios de los ecosistemas, porque cumplen un rol de control, regulación del agua, clima y aire. Todo va a depender de las condiciones temporales del ecosistema, incluso con aquellos de baja productividad, que inciden de manera proporcional en los procesos hidrológicos. Las *biocrusts*, de igual modo, aumentan la infiltración, debido a los diferentes componentes que las conforman, como líquenes o cianobacterias²².

-
- 20 F. STUART CHAPIN, PAMELA A. MATSON y PETER M. VITOUSEK. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*, Nueva York, Springer, 2002.
- 21 BARTOSZ BARTKOWSKI, NELE LIENHOOP y BERND HANSJÜRGENS. “Capturing the complexity of biodiversity: a critical review of economic valuation studies of biological diversity”, *Ecological Economics*, vol. 113, 2015, pp. 1 a 14.
- 22 SONIA CHAMIZO, YOLANDA CANTÓN, EMILIO RODRÍGUEZ CABALLERO y

Las *biocrusts*²³ ejercen funciones ilimitadas en el proceso formativo de los suelos, como comunidad son valoradas estética y culturalmente, mas no en todas las regiones del mundo. No obstante, existen estudios que revelan información acerca de las *biocrusts* y los beneficios que derivan de ellas a la comunidad. El desconocimiento por parte del individuo al realizar actividades, muchas veces contraproducentes, puede perjudicar el correcto funcionamiento que representan en el ecosistema. Por ello, es menester implementar programas de educación ambiental e investigación con el fin de tener un mayor conocimiento acerca de los beneficios y la importancia que significa conservar las *biocrusts*²⁴.

Es importante que los usuarios de agua reconozcan el valor de la biodiversidad con el fin de preservar las fuentes hídricas en buen estado, al hacerlo, acceden a un fondo que luego se rentabiliza para, precisamente, mantener los ecosistemas saludables y recuperar la flora agrícola. Así mismo, los encargados de brindar tales servicios, son remunerados mediante dicho fondo. Los fondos de agua se pueden asociar a determinadas entidades interesadas en el tema, como sucede en Colombia, Ecuador y Brasil.

Por ello, resulta de vital importancia que surja un interés no solo en Sudamérica, sino a nivel mundial para proteger la biodiversidad y los distintos paisajes que preservan y apoyan sobremanera a los servicios ecosistémicos que, a su vez, garantizan la productividad y estabilidad de los agroecosistemas.

En esa línea, es importante mantener estables y ambientalmente adecuadas las fincas típicas de paisajes, cercando bosques en ríos, quebradas y fuentes sostenibles de agua, a fin de generar y conservar una rica variedad de nutrientes en pro del bienestar humano. Todo ello invita a una reflexión mayor que trascienda a niveles globales y no solo delimitar, desde el punto de vista económico, la utilidad del agua con

FRANCISCO DOMINGO. "Biocrusts positively affect the soil water balance in semiarid ecosystems", *Ecohydrology*, vol. 9, n.º 7, 2016, pp. 1.208 a 1.221.

23 Los *biocrusts* son costras biológicas y/o biocorteza compuestas por líquenes, musgos y cianobacterias, poseedoras de biodiversidad funcional, que favorecen procesos de retención e infiltración de agua.

24 EMILIO RODRÍGUEZ CABALLERO, ANTONIO J. CASTRO, SONIA CHAMIZO, CRISTINA QUINTAS SORIANO, MARINA GARCÍA LLORENTE, YOLANDA CANTÓN Y BETTINA WEBER. "Ecosystem services provided by biocrusts: from ecosystem functions to social values", *Journal of Arid Environments*, vol. 159, 2018, pp. 45 a 53.

base a sus servicios ecosistémicos o cubrir los costos de degradación de los suelos²⁵.

La conservación de la biodiversidad, sin duda, afecta las actividades económicas y el bienestar humano. Lo importante es saber equilibrar y prever sus beneficios económicos para no perjudicar el bienestar de la sociedad²⁶.

III. MULTIESPECIES Y SU IMPACTO EN LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

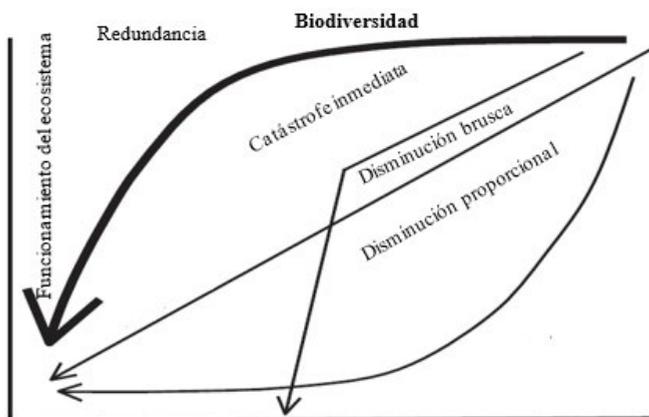
Es necesario tener conocimiento de la importancia que tienen tanto los recursos naturales como los servicios ecosistémicos, ya que son la columna vertebral de todos los sistemas agrícolas y alimentarios. Para asegurar el perfecto funcionamiento de los servicios ecosistémicos, es vital mantener saludables los ecosistemas de las regiones y, sobre todo, proteger su biodiversidad. Es importante entender también que no solo la agricultura se beneficia de tales servicios, sino la ganadería, la pesca, la actividad forestal, etc. Antes bien, se debe prever los efectos negativos o positivos que estas actividades producen en los servicios de los ecosistemas.

Existe una relación capital entre las diversas especies del ámbito ecológico y los servicios ecosistémicos, lo que determinará el idóneo funcionamiento del ecosistema en general. Se han realizado estudios en los que existe una alta probabilidad de que la pérdida de muchos especímenes puede tener un impacto negativo o una disminución de la función o servicio, en comparación con perder solo las primeras especies.

25 WEI ZHANG, MOHAMMAD EHSAN DULLOO, GINA KENNEDY, ARWEN BAILEY, HARPINDER S. SANDHU y EPHRAIM NKONYA. "Biodiversity and ecosystem services", en CLAYTON CAMPANHOLA y SHIVAJI PANDEY (eds.). *Sustainable food and agriculture: an integrated approach*, San Diego, FAO y Elsevier, 2019.

26 SILVIE DANIELS, J. RYAN BELLMORE, JOSEPH R. BENJAMIN, NELE WITTERS, JACO VANGRONSVELD y STEVEN VAN PASSEL. "Quantification of the indirect use value of functional group diversity based on the ecological role of species in the ecosystem", *Ecological Economics*, vol. 153, 2018, pp. 181 a 194.

FIGURA 1. Pérdida de la diversidad y sus posibles consecuencias



Como se aprecia, la curva de redundancia indica una modificación mínima en el ciclo del ecosistema, debido a que una parcela de los organismos suele ser redundante; no obstante, la frecuente pérdida de especies afectaría seriamente la disminución de la función medioambiental. Es decir, la pérdida de las especies altera la función del ecosistema, es proporcional según su cantidad. Por ejemplo, la especie *Keyston* o el ulterior elemento funcional-ecosistémico o la suma de una nueva especie puede ocasionar *ipso facto* una significativa pérdida en el *modus operandi* del ecosistema y su correcto funcionamiento; también suele suceder que una pérdida ínfima de determinados rasgos de especies puede derivar a su posterior debilitamiento.

Ante un escenario incierto acerca del funcionamiento del ecosistema a causa de una posible pérdida total de especies u organismos vivos, se han realizado numerosos estudios y modelos conceptuales que han demostrado lo contrario. Cuán mayor sea la riqueza de dichas especies, mayores opciones habrá para mantener los múltiples procesos de ecosistemas, dado que existe variedad de especies que aportan de manera considerable a tales funciones²⁷.

Recientes y diversas investigaciones han revelado que la biodiversidad cumple un rol indispensable en la prestación de muchos servicios ecosistémicos. A saber, diferentes e ilimitados tipos de especies,

27 LARS GAMFELDT, HELMUT HILLEBRAND y PER R. JONSSON. "Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning", *Ecology*, vol. 89, n.º 5, 2008, pp. 1.223 a 1.231.

su variada genética, los distintos paisajes poblacionales y las cadenas alimentarias son los proveedores clave de servicios ecosistémicos.

Cabe mencionar que la biodiversidad y su impacto en los servicios ecosistémicos han sido materia de estudio y de manipulaciones experimentales, para tener una mayor amplitud de campo y conocimiento. Así mismo, es necesario realizar un cuadro comparativo sistemático-funcional de la biodiversidad a escala espacial de los servicios ecosistémicos, además de investigar a fondo sus efectos finales en la medida en que el ser humano resulte beneficiado.

No se debe confundir los términos biodiversidad y servicio ecosistémico²⁸, porque la primera permite el suministro y funcionamiento de los ecosistemas, los cuales posibilitan el avance de sus procesos funcionales. De igual modo, cabe aclarar que las funciones ecológicas generan servicios que forman parte del funcionamiento y la estructura ecosistémica.

Por otro lado, los servicios ecosistémicos otorgan diversos beneficios a una determinada comunidad o sociedad al depender de los ecosistemas, ya sea para fines domésticos o agrícolas²⁹.

TABLA 1. Bienes y servicios de los ecosistemas

Bienes	Servicio
Depuración del agua y aire	Servicios de regulación
Diseminación de semillas	Mantenimiento de un clima favorable
Ciclaje y movimiento de nutrientes	Mantenimiento de la buena calidad del aire
Disminución de avalanchas e inundaciones	Prevención de enfermedades
Preservación de suelos y renovación de su fertilidad	Prevención y mitigación de inundaciones y avalanchas, irrigación natural
Descontaminación y degradación y residuos (basura)	Mejoramiento de la calidad de agua para consumo
Fertilización de sembríos y vegetación natural	Restauración de la productividad natural de los suelos

28 No es apropiado emplear como sinónimo de servicios ecosistémicos el término servicios ambientales porque no sería consistente con la Evaluación Ecosistémica del Milenio y por prestarse a confusiones con términos de la Organización Mundial del Comercio.

29 La MEA es el reporte internacional oficial para elevar la conciencia y la comprensión de la dependencia de la sociedad en los ecosistemas y, además, es punto de referencia para la investigación sobre servicios de los ecosistemas.

Control de la mayoría de potenciales plagas	Control y disposición de basuras contaminantes.
Provisión de belleza escénica y estimulación intelectual	Fertilización de plantas útiles
Mantenimiento parcial del clima	Servicios de hábitat
Protección de los rayos ultravioletas del sol	Provisión de hábitat para especies útiles o potencialmente útiles (animales y vegetales)
Regulación de eventos extremos del clima y sus impactos	Servicios de producción
Mantenimiento de la biodiversidad	Producción de alimentos, maderas y otros bienes
	Material genético para mejoramiento
	Polinización
	Servicios de información
	Belleza escénica
	Información para la ciencia y la educación

CAPÍTULO SEGUNDO

Análisis económico en materia hídrica y su influencia ecosistémica en la cuenca del río Mariño

I. OBJETIVO

Evaluar desde el punto de vista económico las corrientes hidrológicas y biodiversidad funcional por motivo del agua con fines agrícolas y poblacionales en la cuenca del río Mariño, ubicado en el distrito de Abancay, provincia Abancay, departamento Apurímac, Perú.

II. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Justipreciar la oferta hídrica de la cuenca Mariño.
- b. Evaluar la demanda hídrica del servicio de agua agrícola y poblacional en la cuenca Mariño.

- c. Realizar un balance hídrico de la cuenca Mariño.
- d. Estimar el valor económico del agua por cada ecosistema que posibilita el suministro del servicio ecosistémico hídrico en la cuenca del río Mariño.

III. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática -INEI-, la cuenca del río Mariño tiene una población de 72.277 habitantes, que demandan de un caudal constante de 148,50 l/s, el cual no es cubierto por la oferta, habiendo una disminución de agua de 45 l/s en los meses de estiaje (julio a noviembre), lo que genera problemas de restricción de este servicio.

En dicha cuenca se efectúan actividades agrícolas de la superficie, lo cual genera problemas de erosión, así mismo, prácticas ganaderas de sobrepastoreo que degradan de forma paulatina el suelo, reduciendo la infiltración de agua, lo que afecta de forma significativa los diferentes ecosistemas que se encuentran presentes.

La escasez de agua en época de estiaje resulta de gran preocupación, debido a las actividades mencionadas, por lo que es necesario proteger, conservar y recuperar las cabeceras de la cuenca. No obstante, ello demanda un proceso complejo en el que deben intervenir no solo la comunidad aledaña, sino y sobre todo las autoridades y entidades pertinentes que garanticen la sostenibilidad de la oferta y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos.

El valor del agua se da en función de su valoración económica, del servicio de provisión hídrica (valor real del agua), que involucra la recuperación, captación y protección de este recurso, que sirve así mismo como insumo, el cual permite evaluar el valor total del servicio de productividad hídrica.

El valor total del servicio de productividad hídrica permitirá analizar qué prácticas de conservación y ecosistemas evaluados son más rentables, qué producto de las actividades de conservación genera mayor cantidad de captación, infiltración y abastecimiento de agua.

Como se sabe, la fase de abastecimiento de agua a los usuarios tiene un valor económico que se ha estandarizado en todo el mundo, pero la gran mayoría desconoce o no toman en cuenta los ecosistemas

que se hallan en la cabecera de cuenca, los cuales se constituyen por distintos organismos y especies que componen la biodiversidad funcional, sobre todo las *biocrusts* o costras biológicas que, a mayor abundancia, permiten un mayor proceso de infiltración y recarga hídrica.

Son muchas las causas que afectan la conservación y mantenimiento de la oferta hídrica. En las zonas rurales de países en desarrollo, la provisión de agua que producen los ecosistemas no es reutilizable, razón por la que los encargados directos de tal proceso descuidan muchas veces este recurso, dando origen a su contaminación. A dicho problema, se suma las afecciones y otros resultados sanitarios, los cuales no tardarán en agravarse debido a la celeridad del cambio climático y sus efectos adversos en la producción alimenticia, la disponibilidad de agua y el recrudescimiento de agentes patógenos. No olvidemos que la mayoría de enfermedades existentes son producidas por determinadas falencias de carácter climático, como temperaturas elevadas o muy bajas, humedad atmosférica, el efecto pluvial o periodos de sequías, etc.

Por ello, es menester efectuar una valoración al respecto, dado que la variedad de ecosistemas tiene un impacto diferenciado en la provisión de la oferta hídrica.

Al reconocer, tanto los productores como los consumidores, el gran valor que posee este servicio ambiental, podrían fijar un precio a la oferta y sus tarifas según la demanda poblacional.

Así mismo, se puede retribuir a aquellos productores agrícolas para revertir las prácticas realizadas de degradación a las de preservación y conservación de la superficie y el agua en sí. Cabe mencionar que el uso desmedido de la tierra es una de las causas intrínsecas que influye de manera directa en la baja productividad, y, por ende, en la pérdida considerable de agua.

Es por ello la importancia de la biodiversidad funcional (especies vegetales y organismos vivos como cianobacterias y *biocrusts*) y los flujos hidrológicos para la provisión idónea del agua destinada a las actividades agrícolas como de consumo humano en la cuenca del río Mariño, puesto que, tras evaluar el valor económico de este recurso natural, los ecosistemas de montaña tendrán un mejor funcionamiento.

IV. MÉTODOS Y MATERIALES

La metodología se basa en la valoración económica del agua, considerando la cobertura vegetal en cabeceras de cuencas y la determinación del valor de este preciado recurso.

Dicha metodología tiene tres fases que permitieron tasar el valor promedio de los servicios hídricos ecosistémicos, las cuales se hallan en la cabecera de cuenca del río Mariño. Estas etapas se caracterizan por lo siguiente: i) diagnosticar la oferta del agua que proviene de los ecosistemas de pajonal, bofedal y bosques ecológicos; ii) estimar la demanda hídrica con fines agrícolas y domésticos y iii) valorar el tema económico que involucra el servicio ambiental y los flujos hidrológicos.

A. Objetivo específico 1: Diagnosticar la oferta hídrica en la cuenca del río Mariño

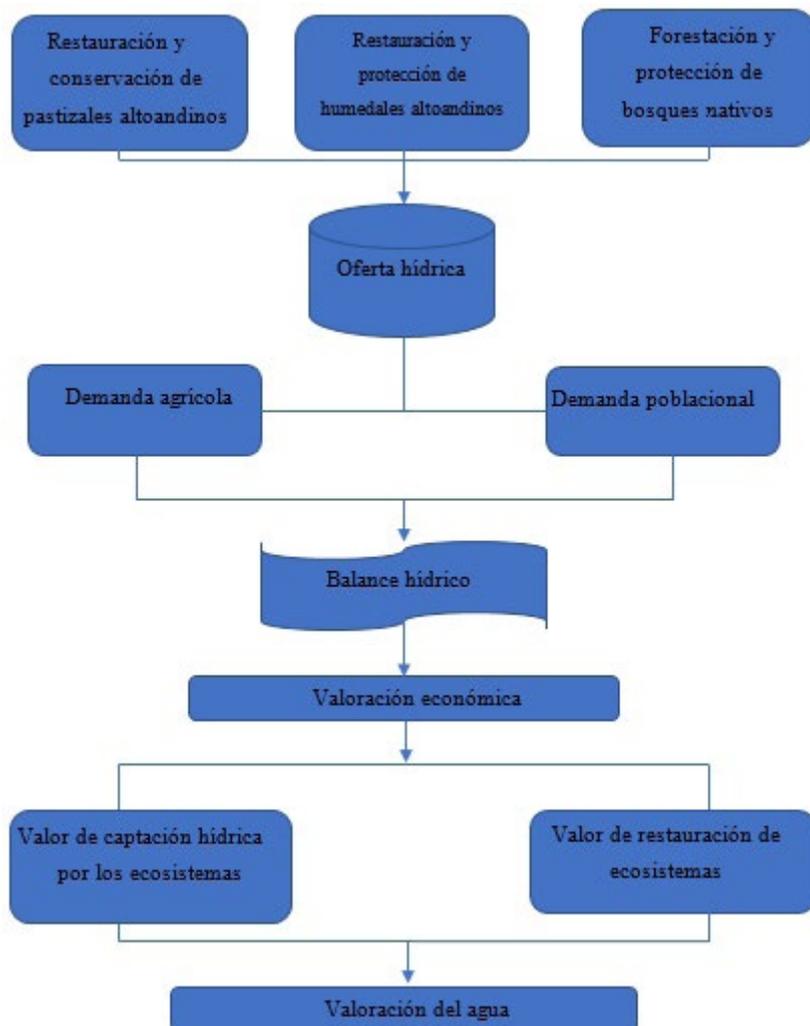
Dicha oferta se evaluó a partir del diagnóstico de caudales en la unidad hidrográfica del río Mariño. Para ello, se consideraron tres ecosistemas: bofedales, bosques nativos y pajonal de puna, los cuales contienen especies de todo tipo que, lo más probable, tengan un vínculo directo con el almacenamiento, interceptación e infiltración del agua.

1. Diagnóstico de la oferta hídrica en la cuenca del río Mariño

El agua disponible en dicha cuenca se tasó mediante el método de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas -CUBHIC-, el que permitió cuantificar la oferta hídrica y sus beneficios adyacentes, así mismo, incluye ciertos parámetros vinculados a la superficie y sus características, la vegetación que influye en la escorrentía y la evapotranspiración. Así, la biodiversidad funcional, presente en la cobertura vegetal y sus beneficios hidrológicos provenientes de los ecosistemas en dicha zona, se encuentra delimitada.

De igual modo, se priorizó la recuperación de pastizales altoandinos, la protección de humedales altoandinos, de bosques, forestación, tal como se aprecia en la Figura 2.

FIGURA 2. Proceso metodológico investigativo



2. Método de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas –CUBHIC–

a. Pastizales altoandinos

Se efectuó un balance hídrico a fin de tasar los beneficios del agua vinculados con actividades ganaderas en la restauración de las praderas altoandinas, del cual se tomó en cuenta la ecuación de balance hídrico dos veces, para determinar sin intervención las condiciones del agua, y luego para graficar las condiciones agua con intervención. La diferencia de tales condiciones permitió tener conocimiento sobre la infiltración en la superficie como consecuencia de la precipitación, así mismo, saber sobre el aumento del caudal base de las fuentes hídricas y el beneficio de la cuenca de interés.

Además, se notó que ciertas acciones, como la clausura de praderas (cercado de pastizales degradados), aumentan de forma considerable la cobertura vegetativa, pasa de manera similar con la restauración ecológica de especies, lo que ocasiona una pérdida relativa de agua por escorrentía. Así mismo, el incremento de tal cobertura afecta también el aumento de la evapotranspiración³⁰.

b. Información para la metodología

1. Datos del área

- Características hidrológicas del suelo.
- Características de la vegetación que inciden en la escorrentía y la evapotranspiración. Aquí está presente la biodiversidad funcional conformada por la variedad de especies que representan un indicador en el rango de estabilidad y resiliencia ecosistémica, dado que tales especies son resultado de un largo período de adaptación a las condiciones boticas y abióticas predominantes.

30 MICHAEL E. FOSTER, DAVID CHEN y MARK S. KIESER. *Metodologías CUBHIC: restauración y conservación de pastizales altoandinos*, Forest Trends, marzo de 2020, disponible en [<https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2020/02/CUBHIC-Restauraci%C3%B3n-y-Conservaci%C3%B3n-de-Pastizales-Altoandinos-.pdf>].

2. Datos climáticos.

- Tasas de precipitación.
- Temperaturas ambientales.

- *Ventajas de la intervención*

La ecuación del balance del agua se realiza dos veces, que muestra las condiciones con y sin la intervención y posteriores a través del promedio de las siguientes variables:

- Evapotranspiración
- Percolación
- Escorrentía superficial
- Contenido de humedad del suelo

- *Estimación diferencial en el caudal base entre las condiciones previas y posteriores*

A continuación, se describen las fases de cálculo orientadas en el balance del agua y sus subcomponentes:

Balance hídrico

A escala de cuenca el balance del agua se evidencia mediante la presente ecuación:

$$P = Q + ET + p + \Delta R$$

Donde:

- P = precipitación (mm)
- Q = escorrentía (mm)
- ET = evapotranspiración (mm)
- p = percolación (mm)
- ΔR = cambio en el contenido de humedad (mm)

Escorrentía o agua superficial

Para calcular la escorrentía o agua superficial, se utiliza la fórmula del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos -scs-. Un número de curva elevado denota superficies más impermeables, en tanto que números de curva bajos representan suelos con alta capacidad de infiltración.

A continuación, se presenta la ecuación del número de curva:

Si $P > 0,05s$, entonces,

$$Q = \frac{(P - 0,05 s)2}{P + 0,95s}$$

Donde:

P = precipitación diaria (mm)

Q = escorrentía superficial diaria (mm)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

CN = número de curva (una función del tipo de suelo y la cobertura vegetal que se selecciona mediante las tablas de búsqueda)³¹.

Recarga de acuíferos y percolación

Debido a la precipitación y/o infiltración, el suelo húmedo tiende al incremento y reducción con la percolación y evapotranspiración hacia las aguas profundas.

$$A = \max (0, R_{t-1} + P - Q - \hat{c})$$

Donde:

\hat{c} = capacidad de campo (mm)

R_{t-1} = contenido de humedad del paso de tiempo previo (mm)

P = precipitación (mm)

Q = escorrentía (mm)

31 U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *National Engineering Handbook: Part 630 - Hydrology*, Washington, D. C., Soil & Water Assessment Tool, 2019.

El fenómeno de la evapotranspiración

La evapotranspiración cumple un rol fundamental en el ciclo hidrológico. Si bien es cierto, comprende la evaporación del agua interceptada por la vegetación, desde el suelo y cuando se produce la transpiración de la vegetación. Las condiciones de humedad, temperatura y punto de marchitamiento afectan la evapotranspiración, no obstante, este no sucede en la etapa de precipitación o en períodos en que la temperatura media se sitúa por debajo de 0 °C; así mismo, no se mitiga el reservorio-suelo de humedad contenida por debajo del punto de marchitez. Dicho fenómeno se calcula antes bien con la tasación de evapotranspiración potencial (E_0), que regula de forma cuantitativa la evaporación admitida por el aire. Luego, la E_0 se multiplica por un coeficiente (r) en función del índice de área foliar (LAI), a fin de evaluar la cantidad real de evapotranspiración:

Si $LAI \geq 3$; $r = I$.

$$r = Er * Es + \frac{LAI}{3}$$

Donde:

Er = evapotranspiración del suelo (coeficiente)

$$Er = exp + \left(\frac{2,5(Rt - 1 - fc)}{fc - wp} \right)$$

Es = evaporación del suelo (coeficiente)

$$Es = 0,0998LAI^2 - 0,6055LAI + 0,933$$

Luego, el producto de E_0 y r influye en la limitación de la evapotranspiración sobre la base del agua accesible en el suelo (agua del suelo en exceso del punto de marchitez)³².

32 SUSAN L. NEITSCH, JEFF G. ARNOLD, J. R. KINIRY y J. R. WILLIAMS. *Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2009*, Texas Water Resources Institute, 2011, disponible en [<https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/128050>].

$$ET = \min (E_0 * r, 0,8 (Rt - 1 + P - Q - p - WP))$$

Mediante la aplicación del método PRIESTLY-TAYLOR, se calcula la E_0 . Los elementos por lo general son constantes, aun cuando el método conlleva el uso de numerosas ecuaciones. Las variables son la latitud, la temperatura y el día³³.

Por consiguiente, dicho método puede presentarse, tal como se aprecia a continuación:

$$E_0 = \frac{(\alpha_{pet} \Delta)}{\lambda(\Delta + \gamma)} (H_{net} - G)$$

Donde:

α_{pet} = coeficiente (1,26)

Δ = pendiente de la curva temperatura-presión de saturación (kPA/°C)

$$\Delta = \frac{4098e_0}{(T + 23,3)^2}$$

Donde:

T = temperatura promedio diario (°C)

e_0 = presión de vapor de saturación (Kpa)

$$e_0 = \exp \left(\frac{16,78T - 116,9}{T + 237,3} \right)$$

λ = calor latente de vaporización (MJ/Kg)

$$\lambda = 2,501 - 0,002361T$$

33 C. H. B. PRIESTLEY, y R. J. TAYLOR. "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters", *Monthly Weather Review*, vol. 100, n.º 2, 1972, pp. 81 a 92, disponible en [https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/100/2/1520-0493_1972_100_0081_otaosh_2_3_co_2.xml].

γ = constante psicrométrica (kPa/°C)

$$\gamma = \left(\frac{0,001013Pa}{0,622\lambda} \right)$$

Pa = presión atmosférica (kPa)

$$Pa = 101,3 - 0,01152EL + 0,544 \times 10^{-6} EL^2$$

EL = elevación sobre el nivel del mar (m)

H_{net} = radiación neta diaria (MJ/m²d)

G = densidad del flujo calorífico hacia el terreno (MJ/m²d).

Esta es mínima y puede asumirse que es 0.

$$H_{net} = (I - \alpha) H_{sw} + H_{lw}$$

Donde:

α = albedo (fracción adimensional de 0 a 1)

H_{sw} = onda corta entrante de radiación

H_{lw} = onda larga de radiación

SWAT utiliza una ecuación de balance, cuya radiación es de onda larga, así mismo, es una función que atañe a la cobertura de nubes y la temperatura.

$$H_{lw} = \frac{c}{0,8} * (0,00376T^2 - 0,0516T - 6,967)$$

Donde:

c = fracción de la cobertura nubosa adimensional (0,5 - 0,8).

Es alta si no existe cobertura de nubes, en cambio, es más baja si presenta una cobertura de nubes más densa. Si no se registran datos sobre la cobertura de las mismas, puede utilizarse el valor medio de 0,65.

T = temperatura media diaria en grados centígrados (°C)

Tal como se utiliza en las ecuaciones SWAT, la radiación de onda corta es una función de la latitud, del día y la cobertura de nubes.

$$H_{SW} = \frac{C}{0,8} * (\delta^2 + b\delta + d)$$

Donde:

a , b , y d = coeficientes dependientes de la latitud, cuyas ecuaciones dependen de la latitud para dichos coeficientes:

$$a = 7,6 \times 10^{-7} \phi^4 + 0,00607 \phi^2 - 14,639$$

$$b = -3,83 \times 10^{-5} \phi^3 + 0,805 \phi$$

$$d = -0,0042 \phi^2 + 29,913$$

ϕ = latitud en grados

δ = declinación solar, donde:

$$\delta = 0,409 \sin \left(\frac{2\pi(\text{dia} - 82)}{365} \right)$$

Humedales altoandinos

Los ecosistemas altoandinos, constituidos por diferentes organismos y especies, son llamados también humedales, capaces de acumular materia orgánica en el suelo oscuro o denominado *turba*. En los Andes del Perú son llamados bofedales, los cuales suministran pastizales para actividades ganaderas, servicio de retención de carbono y regulación del agua.

Los bofedales en sí tienen diferentes funciones en torno al medio ambiente, por lo que producen aquellos servicios ambientales que satisfacen la demanda de un gran porcentaje de la población local y regional.

Los bofedales, con relación a la seguridad hídrica, tienen el beneficio de que posibilitan la disminución de la escorrentía como resultado de las precipitaciones, y generan un potencial elevado en el cúmulo y procedimientos de infiltración de agua.

Información de entrada para el método

- a. Recojo de información básica
 - Particularidades del suelo que perjudican el contenido de humedad.
 - Particularidades de la superficie vegetativa que inciden en la escorrentía y la evapotranspiración.
- b. Entradas específicas de paso de tiempo
 - Evaluación de precipitación diaria.
 - Información de temperatura.

Datos específicos de cuantificación acerca de los beneficios hidrológicos en ecosistemas de humedal altoandino.

- a. Zona de contribución de aguas.
 - Percolación
 - Evapotranspiración
 - Escorrentía
 - Contenido de humedad
- b. Recuperación y protección de humedales
 - Almacenamiento
 - Ingreso de escorrentía
 - Evapotranspiración
 - Salida
 - Infiltración

A continuación, se muestran las distintas fases de cálculo con enfoque en el balance hídrico y sus subcomponentes.

Balance hídrico en el área contribuyente

La precipitación para estimar el balance hídrico en la región contribuyente, a saber:

$$P = Q + ET + p + \Delta R$$

Donde:

- P = precipitación (mm)
- Q = escorrentía (mm)
- ET = evapotranspiración (mm)
- p = percolación (mm)
- ΔR = cambio en el contenido de agua (mm)

Escorrentía

La escorrentía o escurrimiento es un proceso físico que hace alusión al desvío de la corriente del agua pluvial que rebasó cualquier depósito, cauce o superficie en una cuenca de drenaje hasta alcanzar la red fluvial. Así mismo, los parámetros que influyen en la escorrentía son la intensidad de la precipitación y la capacidad de infiltración.

Por ende, se convierte en escorrentía toda infiltración que no llega a infiltrar en el suelo, esto se calcula a través del método de número de curva, empleando “números de curva”, los cuales representan la permeabilidad del suelo y cumplen una función en la superficie vegetal, la cual contiene numerosas especies como líquenes, musgos, costras biológicas, hierbas, etc. La ecuación del número de curva es la siguiente:

Si $P > 0,05s$,

$$Q = \frac{(P - 0,05s)^2}{P + 0,95s}$$

Donde:

- P = precipitación (mm)
- Q = escorrentía (mm)

$$s = \frac{25.400}{CN} - 254$$

CN = número de curva

Ensayo de percolación

La ralentización de los fluidos hídricos dentro del suelo húmedo, es lo que se conoce como percolación. Si bien puede ir en aumento, debido a la infiltración y precipitación, así como puede reducirse por la evapotranspiración y filtración a las aguas bajo tierra. Hay dos entradas húmedas del suelo: punto de marchitamiento y capacidad de campo. Ambas tienen una representación porcentual y se realiza la operación multiplicándose por la profundidad del revestimiento del suelo, a fin de adquirir un determinado valor en milímetros. La profundidad de la capa de la superficie se fija en 150 mm para demarcar la zona enraizada.

El balance del agua se efectúa según determinado periodo. La percolación, en este caso, se da si cualquier líquido en el reservorio del asfalto excediera la capacidad de campo:

$$p = \max (0, R_{t-1} + P - Q - fc)$$

Donde:

- fc = capacidad de campo
- R_{t-1} = contenido de humedad del paso de tiempo previo
- P = precipitación
- Q = escorrentía

Evapotranspiración y evaporación

La evapotranspiración, como se estudió antes, se da cuando la humedad se pierde en una superficie mediante la evaporación en relación proporcional con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Así mismo, se expresa en milímetros por unidad de tiempo. Existen diversos factores que interfieren en dicho proceso, variables que son interceptadas en tiempo y en espacio, y se identifican por causa climática, flora y superficie terrestre.

Mediante la evapotranspiración potencial $-E_o-$ se calcula la evapotranspiración. La E_o se refiere cuando el aire soporta determinada cantidad de evaporación, así mismo, se multiplica por un coeficiente (r) en función del índice de área foliar, a fin de estimar la cantidad real de evapotranspiración. Si $LAI \geq 3$, $r = 1$.

$$ET = \min [E_o * r, 0, 8 (R_{t-1} + P - Q - p - wp)]$$

La metodología PRIESTLY-TAYLOR tiene la siguiente ecuación:

$$E_0 = \frac{\alpha_{pet} \Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)} (H_{net} - G)$$

Donde:

α_{pet} = coeficiente (1,26)

Δ = pendiente de la curva de presión de saturación-temperatura (kPa/°C)

$$\Delta = \frac{4098e_0}{(T + 237,3)^2}$$

T = temperatura media diaria en °C

e_0 = presión de vapor de saturación (kPa)

$$e_0 = \left(\frac{16,78T - 116,9}{T - 237,3} \right)$$

λ = calor latente de vaporización (MJ/kg)

$$\lambda = 2,501 - 0,002361T$$

γ = constante psicrométrica (kPa/°C)

$$\gamma = \frac{0,001013P_a}{0,622\lambda}$$

P_a = presión atmosférica (kPa)

$$P_a = 101 - 0,01152EL + 0,544 * 10$$

EL = elevación (m)

H_{net} = radiación neta diaria (MJ/m²d)

G = densidad de flujo de calor al suelo (MJ/m²d).

Esto es mínimo (se puede suponer que es 0).

La radiación se fija por ecuaciones del modelo SWAT, no obstante, estas pueden ser complejas.

$$H_{net} = (1 - \alpha) H_{sw} + H_{lw}$$

Donde:

α = albedo (fracción adimensional 0-1)

H_{sw} = radiación entrante de onda corta

H_{lw} = onda larga de radiación

Por otro lado, como sucede con las ecuaciones del modelo SWAT, una función de la temperatura y la cobertura de nubes es la radiación de onda larga³⁴.

$$H_{lw} = \frac{c}{0,8} x (0,00376T^2 - 0,0516T - 6,67)$$

c = fracción de cobertura de nubes adimensional (0,3-0,8). Es menor cuando la cubierta nubosa es densa y cero coberturas nubosas para sus valores elevados. Si no existe información de cobertura nubosa disponible, se utiliza el valor medio de 0,5.

Ciertas radiaciones como la de onda corta corresponden a la función de latitud, el día y la cobertura nubosa.

$$H_{sw} = \frac{c}{0,8} (a\delta^2 + b\delta + d)$$

a = $7,6 \times 10^{-7} \phi^4 + 0,00607\phi^2 - 14,639$

b = $-3,83 \times 10^{-5} \phi^3 + 0,805\phi$

d = $-0,0042\phi^2 + 29,913$

ϕ = latitud en grados

δ = declinación solar

34 F. GAO *et al.* "MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo Climate Modeling Grid products and the variability of albedo for major global vegetation types", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D1), 2005.

Donde

$$H_{sw} = 0,409 \text{sen}\left(\frac{2\pi(\text{día} - 82)}{365}\right)$$

Balance del agua (restauración y protección de humedales)

Considerando las entradas y salidas, se puede estimar la modificación en el cúmulo hídrico de un humedal. A causa de la precipitación y la escorrentía, aumenta el volumen de agua del humedal, y disminuye al haber pérdidas por infiltración y evaporación:

$$\Delta W = W_{in} + P - W_E - W_S - W_{out}$$

Donde:

- ΔW = cambio en el almacenamiento de agua del humedal
- W_{in} = ingreso de escorrentía
- P = precipitación sobre la superficie del humedal
- W_E = evapotranspiración del humedal
- W_S = filtración del humedal
- W_{out} = salida del humedal

La entrada al humedal sería la escorrentía de la zona contribuyente. Se parte de la lámina de escorrentía para tasar la lámina de entrada del área contribuyente, y se multiplica por el área (ha) y un factor de conversión (10, 000), luego se fracciona por la zona del humedal (m²):

Donde:

- Q = escorrentía (mm)
- A_c = área de contribución (ha)
- A_w = área del humedal (m²)

La velocidad regulada por la conductividad hidráulica saturada del suelo, permite la filtración correcta en el humedal y, a su vez, el estancamiento. Tal filtración se verifica a través de la siguiente ecuación:

$$W_S = \max\left(0, \frac{-K_{sat}(fc)^2}{(W_{t-1} + W_{in} + P_2)} + K_{sat}\right)$$

Se calcula la evapotranspiración de humedales de forma similar a la zona contribuyente, pero con ciertos cambios, a saber:

E_0 del humedal se estima en función del albedo, que se diferencia del empleado por la región contribuyente. El albedo de humedal es 0,20.

El coeficiente del índice de área foliar (r) en el humedal siempre es igual a 1 y puede ignorarse.

El punto de marchitez del humedal (wp) puede diferir del punto de marchitez empleado para la región contribuyente.

La función de evapotranspiración con relación al humedal se muestra a continuación:

$$W_E = \min (E_0, 0,8(W_{t-1} + W_{in} + P - W_S - wp))$$

Si hubiera un excedente de agua de la capacidad máxima del humedal, se convierte en flujo de salida, el cual se muestra a continuación:

$$W_{out} = \max (0, W_{t-1} + W_{in} + P - W_E - W_S - W_{max})$$

Donde:

W_{max} = profundidad máxima del almacenamiento de humedales (mm)

W_{max} = $1,000 D + 0,5sd$

D = máxima profundidad de agua del humedal (m)

sd = profundidad de la capa del suelo (mm)

El balance de agua (volumen), similar al del suelo, implica numerosos pasos de tiempo, considerando que $\Delta v = V_t - V_{t-1}$, en que t denota el paso de tiempo. Para tasar el volumen hídrico del humedal sobre un paso de tiempo, se puede replantear el balance hídrico, a saber:

$$W_t = W_{t-1} + W_{in} + P - W_E - W_S - W_{out}$$

Donde:

W_t = almacenamiento hídrico del humedal (mm) en el tiempo t

Se deben calcular algunos componentes antes de la exposición de otros que corresponden al balance hídrico del humedal, por lo que se sugiere tasar tal balance de la siguiente manera:

1. Calcular los ingresos
2. Calcular la infiltración
3. Calcular la evaporación
4. Calcular las salidas
5. Actualizar el almacenamiento del humedal

Protección y forestación de bosques nativos

En estos últimos años se talaron una gran cantidad de árboles, cuyas tierras donde antes era el hábitat de millones de especies y animales, se transformaron *a posteriori* en vastas hectáreas baldías. Millones de especies animales y plantas se extinguieron producto de la deforestación, la cual repercutió de manera negativa en el cambio climático, provocando inundaciones, sequías, diluvios, etc. Por ello, la finalidad de este libro es incitar a la reforestación, la cual evitará despoblar de manera arbitraria los bosques nativos.

A la implantación de especies arbóreas o a la regeneración natural en áreas donde hubo bosques o no, se le denomina forestación³⁵. Proteger los bosques, significa evitar su degradación o deforestación, a fin de preservar los ecosistemas y sus servicios hídricos.

Se consideran las ecuaciones de balance de agua y la pérdida de suelo en dos contextos diferentes, para estimar los beneficios que ofrece la forestación. Puede haber un área donde no se intervenga u otra que sí, lo cual conlleva actividades de conservación. Cabe agregar que, los efectos benéficos de la forestación repercuten en una escorrentía mínima, lo que representa una pérdida relativa de suelo y un aumento en la infiltración manifiesta en litros por año.

Existe un procedimiento, tras utilizar la metodología, para estimar los efectos benéficos de cantidad-calidad hídrica, a saber:

35 VIVIEN BONNESOEUR, BRUNO LOCATELLI, MANUEL R. GUARIGUATA, BORIS F. OCHOA-TOCACHI, VEERLE VANACKER, ZHUN MAO, ALEXIA STOKES y SARAH-LAN MATHEZ-STIEFEL. "Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: a systematic review", *Forest Ecology and Management*, vol. 433, 2019, pp. 569 a 584.

- a. Información particular de entrada del ambiente
 - i. Particularidades del asfalto que afectan el contenido húmedo y, muchas veces, provocando la erosión en los suelos.
 - ii. Particularidades de la vegetación que inciden en la escorrentía, evapotranspiración y la erosión de suelos.
- b. Datos de entrada específicos del intervalo de tiempo.
 - i. Tasas de precipitación diaria.
 - ii. Información de temperaturas diarias (máximas, mínimas y promedio).

Así mismo, es necesario cuantificar parámetros, tales como:

- a. Escorrentía de aguas superficiales
- b. Evapotranspiración
- c. Percolación
- d. Contenido de humedad
- e. Pérdida de suelo

Además, se evaluarán los siguientes beneficios:

- a. Resultado diferencial en la escorrentía (aguas superficiales) entre los diferentes ámbitos.
- b. Resultado diferencial en la pérdida de suelos entre escenarios.

A continuación, las fórmulas que determinarán los parámetros, a saber:

i. Ecuación del balance hídrico

Para evaluar el balance del agua, la precipitación se grafica mediante la siguiente ecuación:

$$P = Q + ET + p + \Delta R$$

Donde:

- P = precipitación (mm)
- Q = escorrentía (mm)
- ET = evapotranspiración (mm)
- p = percolación (mm)
- ΔR = cambio en el contenido de humedad (mm)

Las limitaciones de percolación y evapotranspiración se dan de acuerdo con la cantidad existente de humedad. La evapotranspiración tiende a limitarse debido a la afectación de la humedad, por ejemplo, por debajo del punto de marchitamiento. En cuanto a la percolación, esta tiende a limitarse si la humedad se halla a nivel subterráneo.

El balance del agua se distribuye para valorar cuán húmedo se tiene por paso de tiempo, a saber:

$$R_t = R_{t-1} + P - Q - ET - p$$

La escorrentía (Q) es calculada utilizando el método del número de curva:

Si $P > 0,05s$,

$$Q = \frac{(P - 0,05s)^2}{P + 0,95s}$$

Donde:

$$s = \frac{25.400}{CN} - 254$$

Los valores de curvas numéricas -CN- son parámetros hidrológicos de suelo y el tipo de vegetación detectado mediante tablas de búsqueda. Así mismo, se distribuyen cómo han sido tasados los componentes del balance en el siguiente orden:

1. Estimar la escorrentía
2. Estimar la percolación
3. Estimar la evapotranspiración
4. Actualizar el balance del agua en el suelo

Según la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo -USLE-, solo se requiere entradas estándar de la ecuación USLE, volúmenes de precipitación y escorrentía para formular el balance hídrico.

A continuación, se presenta la ecuación USLE estándar:

$$A = R * K * L * S * C$$

Donde:

A = pérdida de suelo (Ton/ha)

R = factor de erodabilidad por acción de la lluvia (MJ*mm/ha*h)

K = factor de erodabilidad del suelo (Ton*h/MJ*mm)

L = factor de longitud de la pendiente (adimensional)

S = factor de inclinación de la pendiente (adimensional)

C = factor de gestión de la cubierta (adimensional)

La ecuación USLE-M es la siguiente:

$$A = R_{UM} K_{UM} L S * C$$

Donde:

R_{UM} = factor de erodabilidad por acción de la lluvia (USLE-M):

$$R_{UM} = RQ / P$$

Q = escorrentía (mm)

P = precipitación (mm)

K_{UM} = factor ajustado de erodabilidad del suelo (USLE-M)

El factor R se expresa según la intensidad y volumen de la precipitación, así mismo, de los aspectos que varían entre un fenómeno y otro.

En consecuencia, para identificar K_{UM} (ubicación donde K , R , Q y P), se formula de la siguiente manera:

$$K_{UM} = K \frac{\sum_1^n R}{\sum_1^n R_{UM}}$$

Donde n = número de eventos de precipitación accesibles para el factor R.

ii. *Tasación de los factores de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo -USLE-*

Se evalúa el factor R para un evento particular de tormenta. A continuación, el factor R se plantea:

$$R = I_{30} \sum_I^m e_m v_m$$

Donde:

La tormenta se divide en m partes. Cada parte es una intensidad de precipitación constante.

e_m = energía unitaria durante la parte m , una función de la intensidad de la lluvia:

$$e_m = 0,29 (1 - 0,72e^{-0,05i_m})$$

i_m = intensidad de la precipitación (mm/h) durante la parte m

v_m = precipitación (mm) durante la parte m

I_{30} = intensidad máxima de la precipitación de 30 minutos (mm/h) durante la tormenta.

Mediante distribuciones de tormenta de diseño de 24 horas, se desarrolló el método de número de curva. El factor R puede estimarse utilizándose el valor de precipitación de 24 horas, cada vez que se ejerce esta distribución de tormenta a un valor de precipitación de 24 horas. Se empleó este método varias veces para distintas profundidades de precipitación, mediante la ecuación que se muestra a continuación:

$$R = 0,0526 * P^{2,218}$$

Puesto que $R_{UM} = RQ/P$, las dos ecuaciones pueden simplificarse:

$$R_{UM} = 0,0526QP^{2,218}$$

Determinación del factor K

El factor K se valora dependiendo del tamaño del diámetro medio de las partículas (se determinará según el tipo de suelo), ello en función de la siguiente ecuación:

$$K = 0,0258 + 0,308e^{\left(\frac{\log(d)+1,659}{1,004}\right)^2}$$

Donde:

d = diámetro medio de las partículas (mm)

El factor K sería 0,30 si se asume que el diámetro medio de las partículas de suelo es 0,01. Asumiendo $\Sigma R = 32$ y $\Sigma R_{UM} = 8$, el K ajustado sería 4. El factor métrico K_{UM} sería entonces $0,1317 \times 4 \times 0,30 = 0,158$.

Determinación del factor LS

Los factores LS son considerados como un solo factor topográfico, de modo que:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1}\right)^2 * (65,41\text{sen}^2 + 4,56\text{sen}\theta + 0,065)$$

λ = longitud de la pendiente (m)

m = $0,6 (1 - e^{-35,835S})$

S = pendiente (m/m)

θ = ángulo de la pendiente en radianes ($\theta = \arctan S$)

iii. Ecuación simplificada de la USLE

Los componentes de USLE-M no varían entre los pasos de tiempo en su gran mayoría y son constantes toda vez que se los ubique de manera adecuada. Así mismo, se condensan en una sola constante a fin de simplificar la ecuación utilizada durante los pasos de tiempo, de modo que:

$$A = U * Q * P^{1,218}$$

Donde:

$$U = 0,052 K_{UM} LSC$$

iv. Percolación (ecuación)

La capa honda del suelo se fija en 150 mm con el fin de representar la zona de la raíz. Cualquier agua en el depósito de contenido húmedo que sobrepase la capacidad del campo, durante cada periodo del balance de agua, se transforma en percolación:

$$p = \max (0, R_{t-1} + P - Q - fc)$$

Donde:

- fc = capacidad de campo (mm)
- R_{t-1} = contenido de humedad del paso de tiempo previo (mm)
- P = precipitación (mm)
- Q = escorrentía (mm)

Evapotranspiración (ecuaciones)

Para evaluar la evapotranspiración, primero se estima la evapotranspiración potencial -PET-, la cual equivale a la cantidad de evapotranspiración que el aire soporta. La PET se multiplica por un coeficiente en función del índice de superficie foliar (LAI), a fin de tasar la cantidad de evapotranspiración suscitada: si $LAI \geq 3$, $r = 1$. Por lo contrario: $r = 0,35 \times \exp (0,35 \times LAI)$. Este coeficiente se presenta mediante una función que limita la evapotranspiración, según el agua disponible (exceso de agua del suelo del punto de marchitez) en el suelo:

$$ET = \min (PET * R, 0,8 (R_{t-1} + P + Q - p - wp))$$

La evapotranspiración potencial se estima a través del método PRIESTLY-TAYLOR, el cual se transcribe de la siguiente manera:

$$PET = \frac{\alpha_{pet} \Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (H_{net} - G)$$

$$\Delta = \frac{4098e_0}{(T + 237,3)^2}$$

$$e_0 = \left(\frac{16,78T - 116,9}{T + 237,3} \right)$$

Donde:

- α_{pet} = coeficiente (1,26)
- Δ = pendiente de la curva temperatura-presión de saturación (kPA/°C)
- T = temperatura media diaria (°C)
- e_0 = presión de vapor de saturación (kPA)
- λ = calor latente de vaporización (MJ/kg)
- γ = constante psicométrica (kPA/°C)
- H_{net} = radiación neta diaria (MJ/m²d)
- G = densidad del flujo calorífico hacia el terreno (MJ/m²d).

Esta es mínima, puede asumirse que es 0.

Las ecuaciones asignadas para la radiación por lo general son complejas. La radiación se graficará mediante ecuaciones del modelo SWAT.

$$H_{net} = (I - \alpha) H_{net} + H_{lw}$$

Donde:

- α = albedo (fracción adimensional entre 0-1)
- H_{sw} = radiación de onda corta entrante
- H_{lw} = radiación de onda larga

La radiación de onda larga es una función de la temperatura y cobertura nubosa.

$$H_{lw} = \frac{c}{0,8} * (0,00376T^2 - 0,0516T - 6,967)$$

Donde:

c = fracción de la cobertura nubosa adimensional (0,5 - 0,8).

Si la cobertura nubosa es más densa, por ende, es más baja. Si no hay una cobertura nubosa, es más alta. Si no se registra información de cobertura nubosa, se puede utilizar el valor medio de 0,65.

T = temperatura media diaria en grados °C.

La onda breve de radiación es una función de la latitud, el día juliano y la cobertura nubosa.

$$H_{sw} = \frac{c}{0,8} (a\delta^2b + \delta d)$$

Donde:

a , b , y d = coeficientes en la latitud $-13,5^\circ$ para Cusco, Perú. Estos coeficientes son iguales a $-13,547$, $-10,797$ y $29,236$. Las ecuaciones con base en la latitud para tales coeficientes, son las siguientes:

$$a = 7,6 \times 10^{-7} \phi^4 + 0,00607 \phi^2 - 14,639$$

$$b = -3,83 \times 10^{-5} \phi^3 + 0,805 \phi$$

$$d = -0,0042 \phi^2 + 29,913$$

ϕ = latitud en grados

δ = declinación solar

Donde:

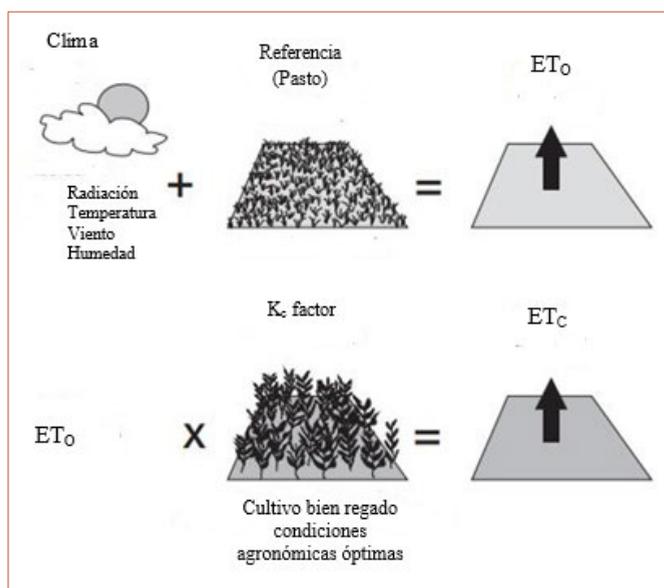
$$\delta = 0,409 \text{sen}\left(\frac{2\pi(\text{día} - 82)}{365}\right)$$

B. Objetivo específico 2. Evaluar la demanda del servicio de agua agrícola y poblacional en la cuenca del río Mariño

– Requerimiento de agua agrícola

Se realizó mediante la tasación de la evapotranspiración real o consuntiva de la cédula de cultivos, como muestra la Figura 3.

FIGURA 3. Cálculo de la evapotranspiración



Fuente: Manual 56 FAO.

Se empleó la metodología de PENMAN-MONTEITH para analizar la evapotranspiración como referencia, cuya fórmula matemática es:

- R_n = radiación neta
- G = flujo del calor en el suelo
- $(e_s - e_a)$ = déficit de presión de vapor del aire
- C_p = calor específico del aire
- c_s = pendiente de la curva de presión de vapor de saturación
- ca = Constante psicrométrica
- r_s y r_a = resistencias superficial (total) y aerodinámica

Las variables del clima se vinculan con las demandas de agua para efectos de cultivos, habiendo necesidades en una etapa desfavorable que no coincide con la evaporación real del cultivo. Es por ello que se aplica una serie de coeficientes correctores o coeficientes de cultivo (K_c), que ajustan las necesidades teóricas a las reales.

La evapotranspiración real es un factor que prioriza los coeficientes de cultivo, que se caracterizan por su gran variedad: leguminosas, tubérculos, cereales, entre otros.

$$ET_c = ET_o * K_c$$

Donde:

- ET_c = evapotranspiración real
- ET_o = evapotranspiración referencial
- K_c = coeficiente de cultivo

– Requerimiento de agua para la población

Los censos de población y datos estadísticos del INEI ayudaron a fijar la demografía. Así mismo, el gobierno regional de Apurímac brindó los datos, puesto que tiene empadronada a la gente de su zona de influencia para ejecutar sus proyectos.

De igual modo, la proyección de la población se efectuó a partir del último censo con una tasa de crecimiento intercensal hasta el periodo actual, según se indica:

- Número de años entre el último censo y el presente año = n
- La población en la actualidad.
- Población actual = población último censo $X = 1 + (1 + t / 100) n$
- Tasa de crecimiento entre últimos dos censos = t % anual

Según el Plan Maestro Optimizado de la EPS EMUSAP ABANCAY S.A.C., la población proyectada al 2018 es de 67.180 habitantes.

Densidad por lote

Se tasó el uso del agua con un promedio de personas por vivienda, según el registro del último censo realizado.

Cobertura de agua potable

La cobertura de agua potable se proyecta con base en un porcentaje poblacional, de modo que dicha cobertura se configura así:

$$\text{Cobertura agua potable (\%)} = \frac{\text{Pob. serv. con agua potable año } n \times 100}{\text{Pob. total año } n}$$

Proyección de la cobertura:

- Para el año base: la cobertura existente.
- Para los demás años: la proyección de cobertura según la compañía que brinda el servicio.

Para ello, se multiplicó la población con el porcentaje de cobertura del servicio de agua para obtener el total de la población atendida en cada año.

Vínculos con usuarios domésticos

Se dividió la población servida-proyectada cada año entre el número de personas por vivienda para establecer la totalidad de conexiones domésticas.

$$\text{Número de conexiones} = \frac{\text{Población proyectada año } n}{\text{Densidad por vivienda}}$$

Usuarios domésticos

Se efectuó el consumo de agua por vivienda/mes y el número de personas por vivienda, con relación al consumo per cápita (l/hab/día), lo que determina el consumo por vivienda (m³/vivienda/mes).

Usuarios no domésticos

El consumo de usuarios no domésticos se determinó multiplicando el consumo promedio mensual por conexión de los usuarios estatales, por el número de conexiones estatales, año a año.

Agua potable

En este caso, se suman los consumos totales de usuarios domésticos y no domésticos (en m³) proyectados para cada año.

C. Objetivo específico 3: Realizar el balance hídrico de la cuenca del río Mariño

Se efectuó el balance hídrico (oferta/demanda), considerando la oferta de agua y demanda con fines agrícolas y consumo humano, con el objeto de conocer los meses en que se calcula el superávit y déficit hídrico.

Hay precipitaciones que percibe la cuenca del río Mariño, las cuales son interceptadas por los ecosistemas bofedal, pajonal/pastizal y bosque nativo, esto con la finalidad de que una parte del agua sea infiltrada y otra sea escurrida, y así obtener la oferta hídrica en una cantidad que puede variar durante el año.

Las precipitaciones tienen ciertas consecuencias: una parte de ellas se evapora, otra es aprovechada e interceptada por la cobertura vegetal, otra parte se escurre por la superficie y, por último, otra se infiltra en el subsuelo. Estos factores son evaluados mediante la metodología CUBHIC.

Establecer la evapotranspiración de los cultivos es de suma importancia, dado que tiene el objetivo de cubrir las necesidades de agua por los cultivos

Un factor importante es evaluar la evapotranspiración de los cultivos, a fin de cubrir las necesidades de agua por las plantaciones. Así mismo, es un factor importante para efectuar el balance hídrico.

D. Obejtivo específico 4: Calcular el valor económico del agua que favorece la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica en la cuenca Mariño

La evaluación económica es importante, pues constituye uno de los objetivos para el uso adecuado del agua y su conservación, así mismo, emplea el mecanismo de precios a fin de darle un óptimo uso a este indispensable recurso.

La intervención monetaria surge como necesidad de mantener estable y en buenas condiciones el servicio ambiental hídrico para su correcta distribución y aprovechamiento. Son tres componentes que justifican el valor económico de este recurso: la restauración de áreas

afectadas por la degradación, la productividad hídrica de la superficie vegetativa y el agua como insumo de la producción³⁶.

Es menester analizar la oferta-demanda del agua a fin de realizar su evaluación económica. A este proceso se le denomina balance hídrico. Teniendo la data respectiva, se gestiona el proceso y conservación del recurso hídrico.

Captación de agua por los ecosistemas (valor)

El revestimiento vegetativo de cada ecosistema contribuye en el valor del agua, no obstante, se debe considerar el valor de la productividad de tal vegetación. Son tres ecosistemas antes mencionados que actúan en la captación hídrica: pastizales altoandinos, bofedales y/o humedales altoandinos y bosques nativos.

Para tasar el valor de captación como un componente determinante en la productividad hídrica de la cobertura vegetal, se solicita lo siguiente:

- El volumen de agua captada cada año por la cobertura vegetal en las áreas de recarga de la cuenca.
- Estimar el costo de oportunidad del uso de la tierra en cabeceras de cuenca.
- Ponderar el tema de la cobertura vegetal en virtud de su productividad hídrica.

Es importante también el impacto positivo que tiene tal cobertura en la calidad del agua de escorrentía superficial. Su valor de captación se grafica así:

$$VC = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i \cdot Bi \cdot Abi}{Va}$$

36 GERARDO BARRANTES MORENO. "Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas", *Revista Lebrer*, n.º 2, 2010, pp. 131 a 160, disponible en [<http://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/LEBRET/article/view/668>].

Donde:

v_c = valor de captación hídrica de la cobertura vegetal
(soles/m³) (cantidad + calidad)

B_i = costo de oportunidad de cualquier actividad económica
que compite con la cobertura vegetal por el uso del suelo
en la cuenca (S/ /ha/año)

A_{bi} = área bajo cobertura vegetal en la cuenca i (ha)

V_a = volumen de agua captada en la cuenca i (m³/año)

α_i = importancia de la cobertura vegetal en la cuenca i en
función de la cantidad y calidad del recurso hídrico $0 \leq \alpha \leq 1$

Cobertura vegetal: restauración por ecosistema

Una actividad indispensable que contribuye a conservar los recursos del agua subterráneos y superficiales, así como evitar los suelos erosionados y la escorrentía, es la restauración de la zona vegetativa. El beneficio de tal actividad conlleva un costo que debiera ser tomado en cuenta dentro de la pirámide económica presupuestal en materia hídrica, a fin de proteger, conservar y recuperar las cuencas de los ecosistemas antes mencionados. Por ello, es necesario realizar una ponderación del total de los costos relacionados a la protección del agua, de modo que se solicita lo siguiente:

- Calcular el número de hectáreas que deben ser recuperadas.
- Estimar los costos de restauración tomando en cuenta el caso similar al del bosque natural antes de ser degradado.
- Ponderar la importancia del bosque en calidad de su productividad hídrica.
- Estimar el volumen hídrico captado en la cuenca.

Por lo tanto, se debe recurrir a la siguiente ecuación para establecer el costo de restauración de la zona vegetal, lo cual incluye proteger, conservar y mantener la biodiversidad en cuencas:

$$VRE = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i \cdot Cr \cdot Arih}{Oci}$$

Donde:

VRE = valor de restauración de la cobertura vegetal en
cabecera de cuenca (soles/m³)

Cr = costos para la actividad j destinada a la restauración del
bosque en la cuenca i (s/ha/año)

$Arih$ = área a restaurar en la cuenca i (ha)

Va = volumen de agua captada en la cuenca i (m³/año)

α_i = importancia de la cobertura vegetal en la cuenca i en
función de la cantidad y calidad del recurso hídrico $0 \leq \alpha \leq 1$

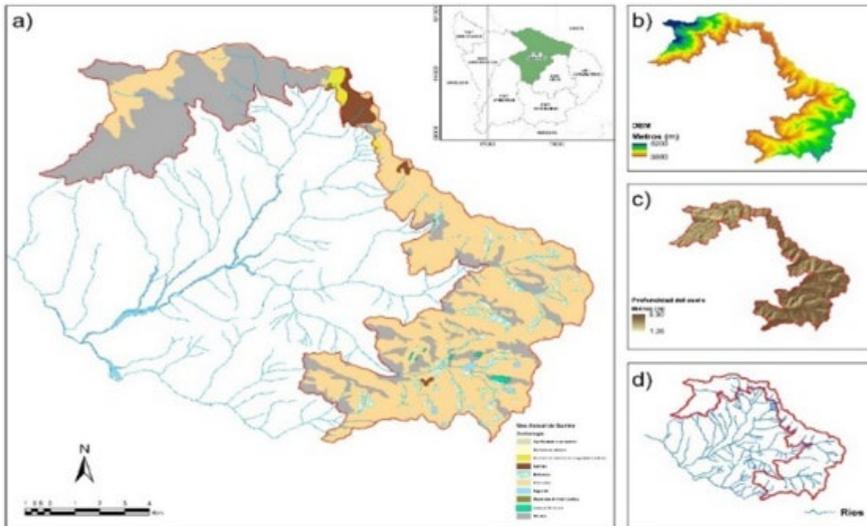
Zonas de vida y balance hídrico

I. OFERTA HÍDRICA A NIVEL DE CUENCAS: RÍO MARIÑO

A. Topología de la cuenca

La cuenca del río Mariño se ubica en la provincia de Abancay, departamento de Apurímac, abarca los distritos de Abancay y Tamburco, y las municipalidades de los centros poblados menores de Villa Ampay y Las Américas. El área total de esta cuenca es de 522 km² de área y 73,30 km de perímetro hasta el punto de entrega al río Pachachaca. Según la metodología *Pfafstetter*, dicha cuenca se encuentra dentro de la intercuenca, la cual, así mismo, se ubica en la unidad hidrográfica del Pachachaca.

Esta cuenca se caracteriza por tener un espacio geográfico muy accidentado, por taludes con visibles pendientes, arroyos profundos y estrechos, ondulaciones altoandinas con contrafuertes andinos y heladas.

FIGURA 4. Demarcación de la unidad hidrográfica Mariño

- a) Tipos de ecosistemas
- b) Modelo de elevación digital
- c) Profundidad del suelo
- d) Red de drenaje

B. Rasgos fisiográficos

Se han registrado tres áreas vegetativas que forman parte de la cuenca Mariño. Así mismo, se verificó la existencia de coberturas ecológicas y vegetales en función de promedios de biotemperatura y precipitación cada año, ello acorde a las áreas latitudinales.

Por otro lado, en las áreas donde se construyen estructuras físicas, se hallan ciertos parajes naturales, tales como el Páramo Húmedo Subalpino Subtropical, Páramo Pluvial Subalpino Subtropical y Bosque Húmedo Montano Subtropical.

Páramo Húmedo Subalpino Subtropical

Su hábitat se encuentra sobre los 3.800 m.s.n.m. de altitud. Se visualiza como una franja extensa, llena de áreas inclinadas, colinadas y suaves. Presenta un clima húmedo y una biotemperatura media anual que varía entre 6°C y 8°C, así como una precipitación pluvial total promedio que varía por año entre 600 mm y 700 mm.

La evapotranspiración potencial promedio varía entre la mitad y una cantidad igual que el volumen de precipitación promedio total por año, lo que la ubica en la categoría “húmedo”. En cuanto a su vegetación, predomina una mezcla de gramíneas denominadas *ichu*, que constituyen los pajonales de puna; y otras hierbas de superficies leñosas como la queuña *polylepis sp.*

Páramo Pluvial Subalpino Subtropical

Esta zona vegetativa es húmeda, se halla entre los 4.300 y los 4,500 m.s.n.m. Presenta una temperatura media anual entre 3°C y 4,5°C y de congelación, y un superávit de humedad del suelo, así mismo, con una precipitación pluvial total (anual) arriba de los 670 mm. El promedio de la relación de evapotranspiración potencial total por año varía entre 0,125 y 0,25.

Por otro lado, el relieve del terreno es accidentado de manera moderada. Su cobertura vegetativa se caracteriza por estar poblada de herbazales altoandinos, donde se sitúan las gramíneas y otras especies.

Su revestimiento presenta una infiltración hídrica abundante en tiempos de precipitación y escorrentía mínima, mitigando los problemas de erosión. Así mismo, el acuífero se recarga como resultado de la infiltración, lo que permite tener acceso al agua que surge en la parte baja y media del territorio, causando una oferta hídrica para el avance de las diversas labores consuntivas-no consuntivas.

Bosque Húmedo Montano Subtropical

Su ubicación alcanza los 3.800 y 3,900 m.s.n.m, de clima húmedo también, con una temperatura anual media que fluctúa entre 6° C y 8°C y una precipitación pluvial total promedio anual que varía entre 650 y 700 mm. La evapotranspiración potencial total puede variar periódicamente entre la mitad y una cantidad igual al volumen de precipitación promedio total. Este paraje natural contiene importantes lagunas y se encuentra dentro de la categoría *húmedo*.

La zona presenta matorrales con especies arbustivas de carácter perennifolio y pastos naturales. Prevalece una capa herbácea, donde se encuentran distintos tipos de gramíneas: *festuca*, *muhlenbergia*, *calamagrostis* y *stipa*. Así mismo, en dicha cobertura se pueden apreciar praderas para actividades de pastoreo de ganado y agricultura de secano, donde se siembran diversas especies como papa (*solanum tuberosum*), olluco (*ullucus tuberosus*) y oca (*oxalis tuberosa*).

C. Información hidrométrica-hidrometeorológica

1. Variables climatológicas

A rasgos generales, el clima en la cuenca Mariño es uniforme, dado que el periodo intenso de lluvias es corto, con una precipitación arriba de los 500 mm; de igual modo, hay humedad, pero leve. La época de estiaje se presenta en los meses de mayo a septiembre.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología -SENAMHI- presentó datos sobre las estaciones meteorológicas de Curahuasi, Andahuaylas, San Antonio y Tambobamba, así como se evidenciaron las principales variables climatológicas.

TABLA 2. Estaciones meteorológicas en la zona de influencia de la cuenca Mariño

Estación	Tipo	Ubicación política		
		Departamento	Provincia	Distrito
Granja San Antonio	MAP	Apurímac	Abancay	Abancay
Curahuasi	CP	Apurímac	Abancay	Curahuasi
Andahuaylas	CO	Apurímac	Andahuaylas	Andahuaylas
Tambobamba	CO	Apurímac	Cotabambas	Tambobamba

Ubicación UTM - Zona 18S			Periodo
Este (m)	Norte (m)	Altitud	
730.391	8.494.581	2.750	1964 - 2017
748.731	8.500.595	2.763	1964 - 2017
676.214	8.489.622	2.865	1964 - 2017
805.233	8.456.551	3.317	1964 - 2017

Fuente: SENAMHI.

2. Recurso hídrico disponible

Biodiversidad y su impacto en la infiltración hídrica (cuenca Mariño)

Una de las prácticas que se tienen en cuenta para la recolección de agua pluvial, el mantenimiento del agua y suelo, así como la recarga de acuíferos, es edificar zanjas de infiltración hídrica en las laderas, que se describen como pequeños fosos de tierra curvilíneos. Tales zanjas, muchas veces, son construidas sin conocimiento necesario, sin contar con las previsiones del caso para afrontar los impactos adversos, tampoco se implementan sistemas de monitoreo para un próximo control de los mismos.

Por ello, se emplearon en dos zonas diferentes -con y sin cobertura vegetal- los anillos infiltrómetros (doble anillo), como prueba de infiltración para fijar la forma como se infiltra el agua en la cuenca Mariño, así mismo, determinar el grado de interceptación e infiltración del agua.

Se realizaron inventarios sobre la diversidad especies existentes, partiendo de la interceptación e infiltración del agua en el suelo, que coadyuva a almacenar agua subterránea que, a la postre, se muestra en fuentes hídricas, tales como quebradas, lagunas y manantiales, y aguas debajo de las zonas de recarga.

Existe una gran variedad de especies frecuentes por grupo funcional, como las gramíneas, graminoides, etc. Esto revela un indicador de estabilidad y permanencia del ecosistema en el tiempo. Y es que tales especies son producto de un largo proceso de adaptación a las condiciones bióticas-abióticas predominantes en el ecosistema. En esa línea, si las especies abundan, esto hará que el ecosistema se adapte y amplíe mejor ante los embates del clima y sus efectos adversos, de igual modo, tendrá un mayor efecto en torno a los procesos de infiltración e interceptación hídrica en el suelo.

TABLA 3. Diversidad de especies en el bofedal de la cuenca Mariño

Familia	Especie	Nombre común
Apiaceae	<i>Lilaeopsis macloviana</i>	Caña caña
Asteraceae	<i>Cotula mexicana</i>	
	<i>Cuatrecasasiella isernii</i>	
	<i>Hypochaeris taraxacoides</i>	Pilli pilli
	<i>Werneria pygmaea</i>	Cebolla wiskor
	<i>Werneria apiculata</i>	
	<i>Cuatrecasasiella isernii</i>	
	<i>Oritrophium limnophilum</i>	
	<i>Belloa kunthiana</i>	Wira wira
Campanulaceae	<i>Lobelia oligophylla</i>	Chiñi kururu
	<i>Lysipomia pumila</i>	
Cariophyllaceae	<i>Arenaria digyna</i>	
Cyperaceae	<i>Carex ecuadorica</i>	Ccora
	<i>Carex tristicha</i>	
	<i>Eleocharis sp</i>	
	<i>Zameioscirpus muticum</i>	
	<i>Trichophorum</i>	
	<i>Phylloscirpus deserticola</i>	
Gentianaceae	<i>Gentiana sedifolia</i>	Penca penca
	<i>Gentiana sp</i>	
	<i>Halenia minima</i>	
Isoetaceae	<i>Isoetes saracochensis</i>	
Juncaceae	<i>Distichia muscoides</i>	Kunkuna
	<i>Juncus bálticos</i>	
	<i>Luzula racemosa</i>	
Lycopodiaceae	<i>Huperzia crassa</i>	
Orchidaceae	<i>Myrosmodes paludosum</i>	Atoj ullu
	<i>Ourisia muscosa</i>	
Plantaginaceae	<i>Plantago tubulosa</i>	
	<i>Plantago rigida</i>	

Poaceae	<i>Aciachne pulvinata</i>	Pacu pacu
	<i>Calamagrostis vicunarum</i>	
	<i>Poa perguliata</i>	
	<i>Calamagrostis rigescens</i>	Callo callo
Phrymaceae	<i>Mimulus glabratus</i>	
Rosaceae	<i>Alchemilla pinnata</i>	Sillu sillu
	<i>Lachemilla diplophylla</i>	Libro libro
Violaceae	<i>Viola Sp</i>	
Total	38	

FIGURA 5. Familia de especies en ecosistema de bofedal (cuenca Mariño)

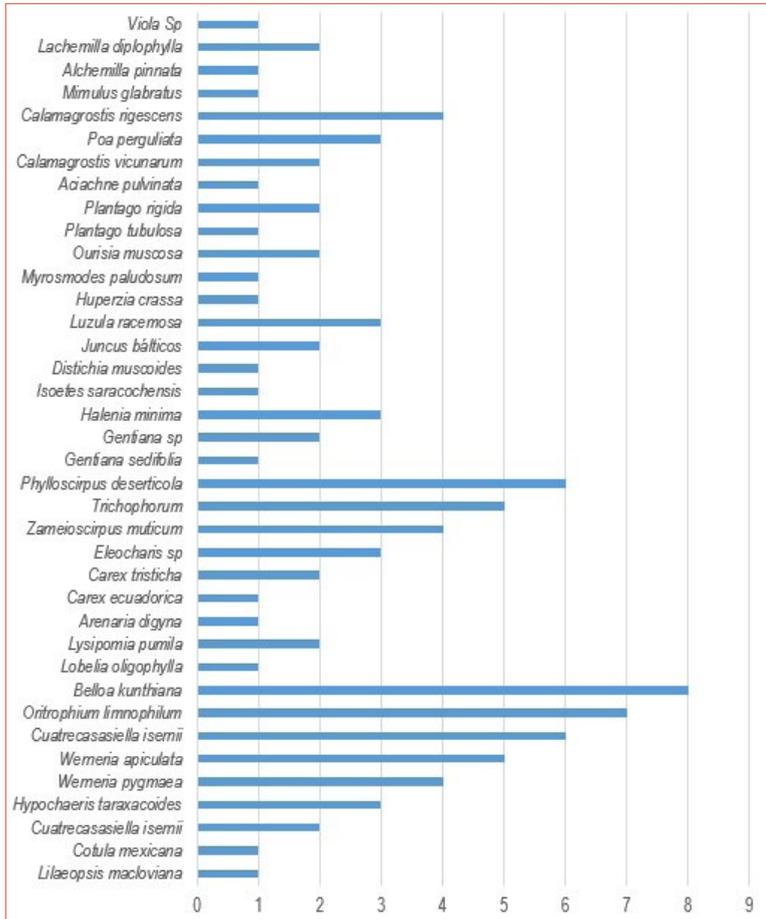


FIGURA 6. Bofedal Allpacchocha**FIGURA 7.** Bofedal Rontoccocha

FIGURA 8. *Distichia muscoides*, especie que permite la interceptación e infiltración del agua



FIGURA 9. *Lobelia oligophylla* (izq), *Cotula mexicana* (der)



TABLA 4. Diversidad de especies de pajonal y césped de puna

Familia	Especie	Nombre común
Apiaceae	<i>Azorella biloba</i>	
	<i>Azorella sp</i>	
	<i>Oreomyrrhis andina</i>	
Asteraceae	<i>Aphanactis villosa</i>	
	<i>Baccharis caespitosa</i>	
	<i>Baccharis tricuneata</i>	
	<i>Beloá sp</i>	
	<i>Bidens triplinervia</i>	
	<i>Gnaphalium sp</i>	Wira wira
	<i>Hypochaeris taraxacoides</i>	
	<i>Lucilia kunthiana</i>	
	<i>Paranephelius uniflorus</i>	
	<i>senecio sp.</i>	
	<i>Werneria nubigena</i>	
<i>Werneria pectinata</i>		
Cactaceae	<i>Austrocylindropuntia floccosa</i>	Huaraco
	<i>Echinopsis maximiliana</i>	
Caprifoliaceae	<i>Belonanthus sp</i>	
Caryophyllaceae	<i>Pycnophyllum molle</i>	Pesque
	<i>Arenaria sp</i>	
Cyperaceae	<i>Carex ecuadorica</i>	
	<i>Scirpus rigidus</i>	
Euphorbiaceae	<i>Euphorbia sp</i>	
Fabaceae	<i>Astragalus garbancillo</i>	Juska
	<i>Lupinus</i>	
	<i>Trifolium ambile</i>	
Gentianaceae	<i>Gentiana sedifolia</i>	
Geraniaceae	<i>Gentiana sedifolia</i>	
	<i>Geranium sessiliflorum</i>	
Juncaceae	<i>Luzula racemosa</i>	
Lamiaceae	<i>Lepechinia meyenii</i>	Salvia
Malvaceae	<i>Acaulimalva engleriana</i>	
	<i>Nototriche</i>	
Orchidaceae	<i>Myrosmodes paludosa</i>	
Orobanchaceae	<i>Castilleja pumila</i>	

Plantaginaceae	<i>Plantago tubulosa</i>	
Poaceae	<i>Aciachne pulvinata</i>	Pacu pacu
	<i>Calamagrostis recta</i>	
	<i>Calamagrostis rigescens</i>	
	<i>Calamagrostis sp</i>	
	<i>Calamagrostis vicunarum</i>	Crespillo
	<i>Dissanthelium sp</i>	
	<i>Festuca dolichophylla</i>	Chilligua
	<i>Muehlenbergia ligularis</i>	Gramma dulce
	<i>Poa sp</i>	
	<i>Stipa ichu</i>	Ichu
Ranunculaceae	<i>Oreithales integrifolia</i>	
Rosaceae	<i>Alchemilla orbiculata</i>	
	<i>Alchemilla pinnata</i>	Sillu sillu
Rubiaceae	<i>Galium corymbosum</i>	
Solanaceae	<i>Solanun acaule</i>	
Violaceae	<i>Viola pymaea</i>	
Total	52	

FIGURA 10. Familia de especies en ecosistema de pajonal y césped de puna

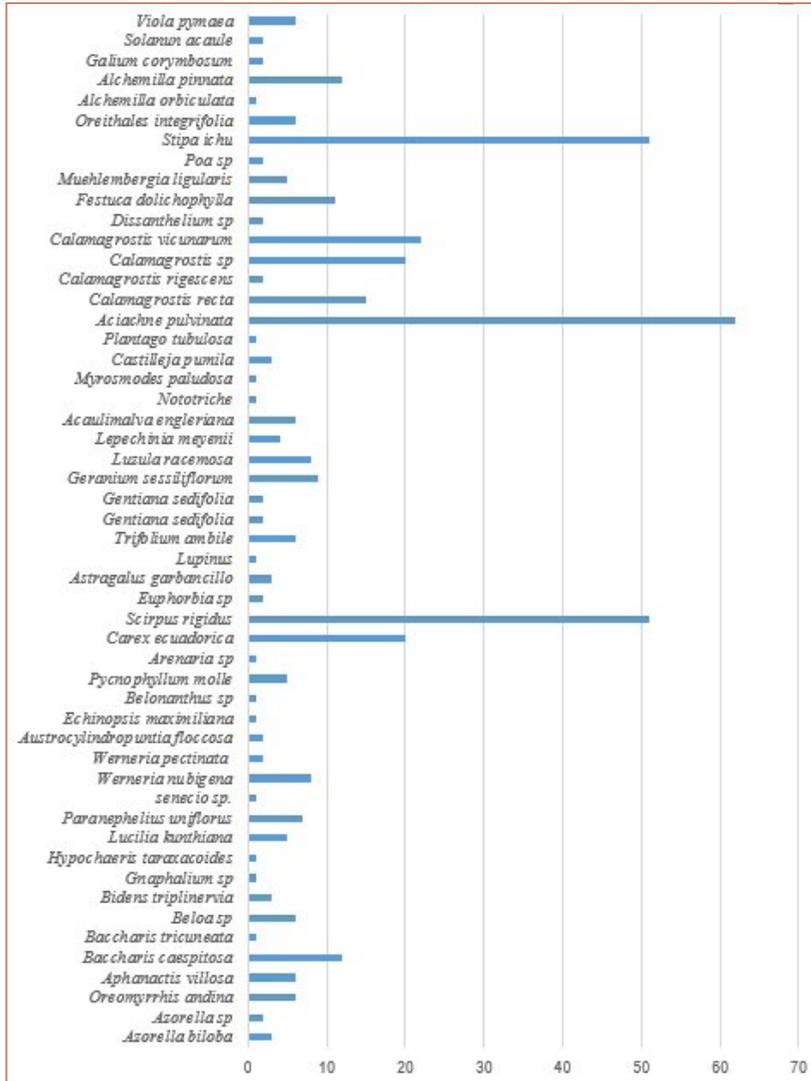


FIGURA 11. Pajonal aledaño a la laguna de Rontoccocha en proceso de degradación



FIGURA 12. *Stipa ichu*, comunidad de Micaela Bastidas en la cuenca del Mariño



3. Infiltración de agua (bofedal y pajonal de puna)

Se establecieron los promedios de lámina infiltrada y velocidad de infiltración en los ecosistemas de bofedal y pajonal de puna. Se utilizó el método de los anillos infiltrómetros. De igual manera, se consideraron como parámetros los tipos de cobertura vegetal y de suelo, vinculados con el proceso de infiltración de agua en el suelo.

TABLA 5. Ecosistemas de pajonal y césped de puna (infiltración de agua)

Prueba n.º	Localidad	Coordenadas UTM		Duración de la prueba de campo min	Promedio lámina infiltrada acumulada cm/h	Promedio de velocidad de infiltración cm/h	Clase de velocidad de infiltración Interpretación
		Este	Norte				
1	Pajonal Rontoccocha 1	73.8642	84.86688	120	2,04	2,30	Moderada
2	Bofedal Rontoccocha 1	73.9416	84.87555	120	18,55	26,30	Muy rápida
3	Bofedal Rontoccocha 2	73.9098	84.87252	120	10,09	15,95	Rápida
4	Bofedal Rontoccocha 3	73.8575	84.87330	120	11,12	14,90	Rápida
5	Bofedal Rontoccocha 4	73.8534	84.86668	120	11,95	19,00	Rápida
6	Bofedal Rontoccocha 5	74.0328	84.86532	120	8,26	16,85	Rápida
7	Pajonal Rontoccocha 2	73.8993	84.86664	120	1,45	1,80	Moderadamente lenta
8	Pajonal Allpaccocha 1	74.0695	84.85367	120	1,02	1,30	Moderadamente lenta
9	Pajonal Allpaccocha 2	74.1060	84.85640	120	1,21	1,45	Moderadamente lenta
10	Bofedal Allpaccocha 1	74.1452	84.85596	120	6,77	8,70	Moderadamente rápida
11	Pajonal Ccecceracocha 1	74.0073	84.84806	120	2,89	2,55	Moderada
12	Pajonal Ccecceracocha 2	74.0053	84.83894	120	1,19	1,25	Moderadamente lenta
13	Pajonal Ccecceracocha 3	74.0095	84.85027	120	3,20	3,65	Moderada
14	Bofedal Allpaccocha 2	74.0744	84.85060	120	5,37	7,50	Moderadamente rápida

Cabe mencionar que el bofedal contiene especies diversas como el wira wira (*bellosa kunthiana*), *cuatrecasasiella isemii*, *trichophorum* y *wemeria pygmaea*, *distichia muscoides*, etc. El tipo de suelo está conformado por turba y materia orgánica en descomposición pertenecientes a las *biocrusts*.

Comparando los resultados obtenidos, el ecosistema de bofedal presenta mejores condiciones de infiltración, debido a su cobertura vegetal y sus costras biológicas restauradas, gracias a las actividades de conservación de ecosistemas.

4. Determinación de la oferta hídrica en ecosistemas

Mediante el método CUBHIC se determinó la oferta hídrica en distintos ecosistemas, como los de pastizal de puna, forestación nativa, bofedales y/o humedales.

Oferta hídrica en el pastizal altoandino

El ecosistema de pastizal altoandino posee un área de 800 hectáreas. Este ecosistema se conforma por especies como *aciachne pulvinata*, *scirpus rigidus* y *stipa ichu*. El tipo de suelo es de textura areno-limosa con un mínimo contenido de materia orgánica.

Así mismo, se consideró la precipitación promedio diaria anual de la estación San Antonio para determinar la oferta total, que asciende a 1045,8 mm/año, el número de curva -CN- es 69, el índice de área foliar -LAI- es de 2,5 m²/m² y la evapotranspiración real es de 678 mm/año, el promedio de evapotranspiración real (ETO) es de 1,85 mm/día.

La escorrentía y la percolación son los parámetros que inciden de manera directa en la oferta hídrica y aumentan la oferta hídrica superficial y subterránea; la escorrentía generada es de 57,61 mm/ha/año, que produce a la vez 460.946 m³/año, en un área de 800 ha de ecosistema de pastizal (pajonal) de puna; la percolación es de 366,88 mm/año, que genera 2.935. 075 m³/año para la misma área de pastizal, así mismo, la oferta total en este ecosistema es de 3. 396. 021 m³/año. Los resultados se muestran en la Tabla 6 y Figura 13.

TABLA 6. Oferta hídrica en ecosistema de pastizal (pajonal) de puna en la cuenca del Mariño

Parámetro	Lámina de agua (mm/año)	Volumen (m ³ /año)
Escorrentía	57,61	460.946,36
Percolación	366,88	2.935.075,03
Total	424,49	3.396.021,38

FIGURA 13. Volumen de agua en m³/año en ecosistema de pastizal en la cuenca del Mariño

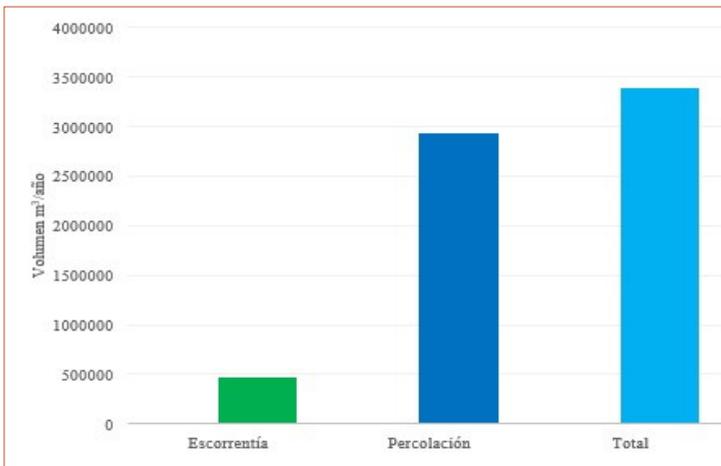


FIGURA 14. Escorrentía en el ecosistema de pastizal

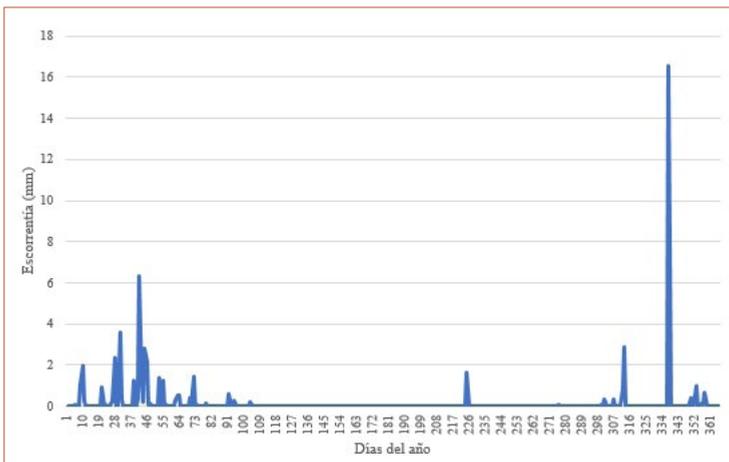
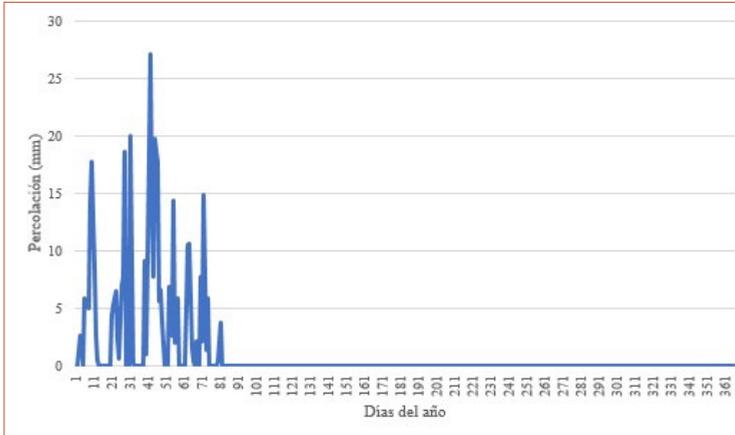


FIGURA 15. Percolación en el ecosistema de pastizal



Oferta hídrica en el ecosistema de bofedal

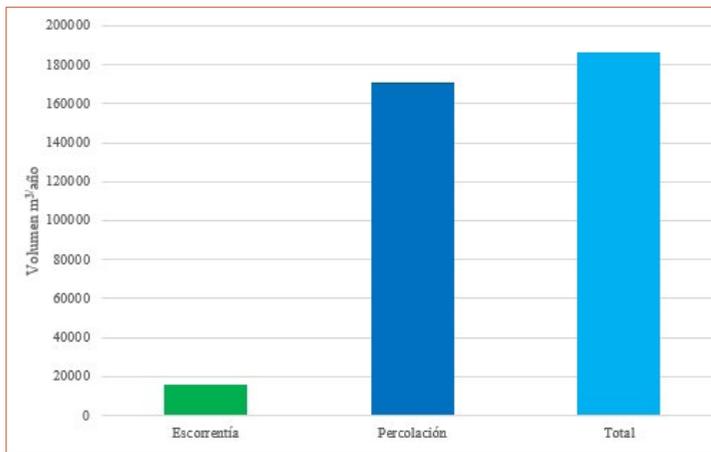
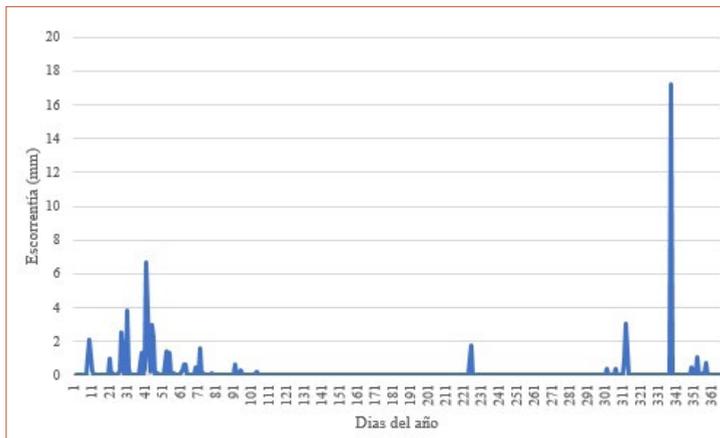
El ecosistema de bofedal posee 200 hectáreas, donde destacan las especies wira wira (*beloa kunthiana*), *cuatrecasasiella isemii*, *trichophorum* y *wemeria pygmaea*, provenientes de las asteráceas y cyperáceas. Así mismo, abundan las *biocrusts* como las cianobacterias, algas, líquenes y musgos sobre la superficie del suelo, las que retienen agua y mediante ellas se realiza una mayor percolación e infiltración subterránea.

La oferta total se determinó mediante la precipitación promedio diaria anual de la estación San Antonio, la cual asciende a 1045,8 mm/año, el número de curva es de 70, el índice de área foliar es de 1,5 m²/m², la evapotranspiración real es de 304,38 mm/año y el promedio de evapotranspiración real es de 0,83 mm/día.

Así mismo, la oferta hídrica estuvo influenciada por determinados parámetros, como la percolación y la escorrentía, que provocan el aumento de la oferta hídrica superficial y subterránea. A saber, la escorrentía es de 61,81 mm/ha/año, que genera a su vez 15.454,50 m³/año en un área de 200 ha de ecosistema de bofedal; la percolación es de 681,50 mm/año, que genera 170.376,34 m³/año en la misma zona ecosistémica. Finalmente, la oferta total en este ecosistema es de 185.830,84 m³/año.

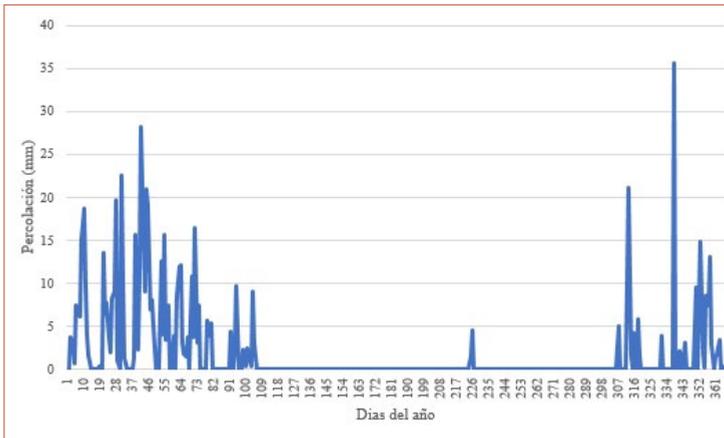
TABLA 7. Oferta hídrica en ecosistema de bofedal en la cuenca del Mariño

Parámetro	Lámina de agua (mm/año)	Volumen (m ³ /año)
Escorrentía	61,81	15.454,50
Percolación	681,5	170.376,34
Total	743,31	185.830,84

FIGURA 16. Volumen de agua en m³/año en ecosistema de bofedal en la cuenca del Mariño**FIGURA 17.** Escorrentía en el ecosistema de bofedal

La escorrentía puede variar por periodos largos. Por lo general, en los primeros y últimos días del año surge un aumento considerable en la escorrentía, como consecuencia de las precipitaciones, influye también la densidad de la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la pendiente del terreno. Este parámetro es variable dependiendo de cada año, el cual puede ser año seco o año lluvioso.

FIGURA 18. Percolación en el ecosistema de bofedal



En esta figura se puede apreciar el comportamiento del proceso de percolación durante el año. Hay una mayor percolación en los primeros y últimos días/meses del año, a causa de las precipitaciones. Abundan especies que constituyen la biodiversidad funcional, como la *cuatrecasasiella isemii*, *trichophorum*, *wira wira (beloa kunthiana)* y *wemeria pygmaea*, que corresponden a las familias de las *asteraceas* y *cyperaceas*, y de las *biocrusts*. Gracias a ellas se suscita una mayor infiltración y percolación que recarga el acuífero, produciendo una mayor oferta de agua en la cuenca media y baja del río Mariño.

Ecosistema de bosque nativo

El bosque nativo es un ecosistema forestal conformado por 135 hectáreas, con un sinnúmero de especies que se ubican en los alrededores de las lagunas de Jejeracocha, Rontoccocha y Yauriccocha, y en la cabecera de la cuenca del río Mariño. Además, este ecosistema permite mitigar la escorrentía, interceptar la precipitación, incrementar la infiltración-percolación y el agua del subsuelo.

Así mismo, se consideró la precipitación promedio diaria anual de la estación San Antonio, que asciende a 1045,8 mm/año, el número de curva es 70, el índice de área foliar es de 1,25 m²/m², el promedio de evapotranspiración real es de 1,53 mm/día y la evapotranspiración real es de 557,78 mm/año.

La oferta hídrica superficial y subterránea se incrementa debido a la percolación y la escorrentía; la escorrentía es de 61,81 mm/ha/año, que produce a su vez 83.454 m³/año en un área de 135 ha de ecosistema de bosques nativos. La percolación es de 443,88 mm/año, que causa 599.242 m³/año para la misma área descrita. La oferta total en esta zona de vida es de 682.697 m³/año.

TABLA 8. Oferta hídrica en ecosistema de bosque nativo en la cuenca del Mariño

Parámetro	Lámina de agua (mm/año)	Volumen (m ³ /año)
Escorrentía	61,81	83.454
Percolación	443,88	599.242
Total	505,69	685.697

FIGURA 19. Volumen de agua en m³/año en ecosistema de bosque nativo en la cuenca del Mariño

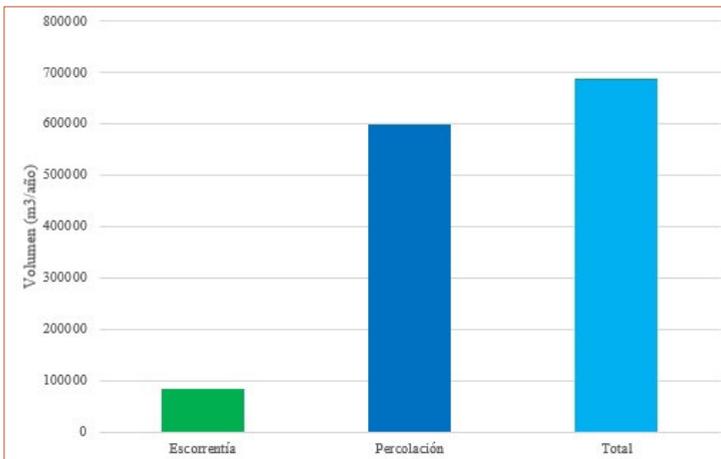
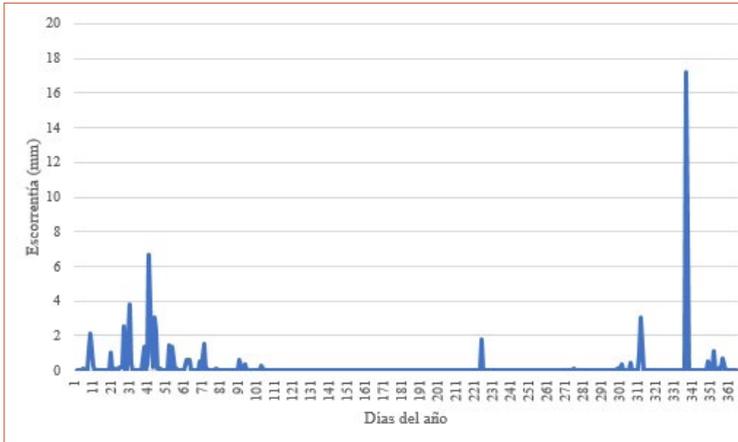
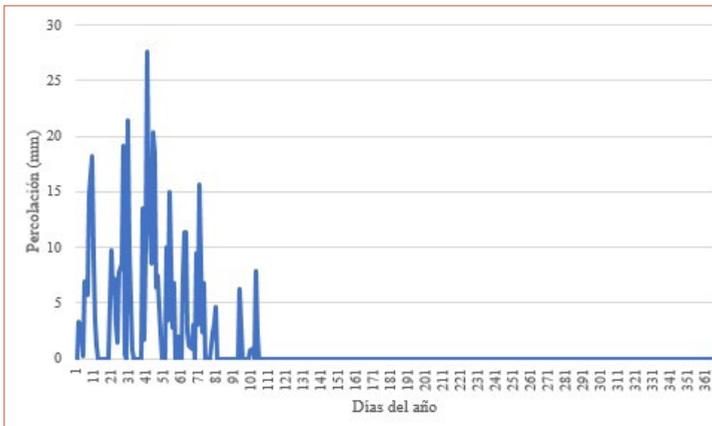


FIGURA 20. Escorrentía en el ecosistema de bosque nativo

Como se advierte en la presente figura, la escorrentía es variable de forma periódica, debido a las precipitaciones. De igual manera, la escorrentía conlleva la intensidad de la precipitación, la densidad del revestimiento vegetativo, el tipo de asfalto y la pendiente del terreno.

FIGURA 21. Percolación en el ecosistema de bosque nativo

Tal como se muestra, la percolación en dicho ecosistema se constituye por organismos y especies como *buddleja sp.*, *polylepis racemosa*, *gynoxys sp.*, *ribes sp.*, y *escallonia myrtilloides*. El proceso de percolación es más pronunciado en los primeros días y meses del año, resultado de las precipitaciones. Dicho ecosistema mitiga la escorrentía cuando las precipitaciones son interceptadas, dando origen a la erosión de suelos.

Este ecosistema mediante sus raíces permite una amplia percolación, dado que estas raíces contribuyen a que el agua se filtre por las capas bajo tierra y aumente el volumen del agua en el acuífero.

TABLA 9. Oferta hídrica total considerando los tres ecosistemas evaluados en la cuenca del Mariño

Id	Ecosistema	Zona de ecosistema (ha)	Escorrentía (mm/año)	Percolación (mm/año)	Volumen escorrentía (m ³ /año)	Volumen percolación (m ³ /año)	Volumen Total (m ³ /año)
1	Pastizales altoandinos	800	57,61	366,88	460.946	2.396.021	3.396.021
2	Bofedales y/o humedales	25	61,81	681,5	15.455	170.376	185.831
3	Bosques nativos	135	61,81	443,88	83.454	599.243	685.697
Total		960	181,23	1.492,26	559.855	3.165.641	4.267.549

Las tres zonas de vida albergan 960 hectáreas, cuyos resultados son los siguientes: la escorrentía total es de 181,23 mm/año, la percolación es de 1492,26 mm/año, el volumen total de percolación es de 3.165.640 m³/año, el volumen total de escorrentía es de 559.855 m³/año y el volumen total de generación de caudales (oferta hídrica) es de 4.267.549 m³/año.

El ecosistema que produce una vasta oferta de agua (800 ha), es el pastizal altoandino, así mismo, tiene un volumen de percolación de 2.396.021 m³/año, y un volumen total de 3.396.021 m³/año. El ecosistema de bofedal tiene un aporte de 185.830 m³/año, al mismo tiempo que contribuye al volumen total de la oferta hídrica con el fin de satisfacer la demanda de agua para uso doméstico y agrario.

5. Demanda de agua en la cuenca del río Mariño

El agua para actividades agrícolas

En la cuenca Mariño los sistemas de riego se encuentran agrupados en 77 comités de usuarios de riego, tres comisiones de usuarios de riego, por ejemplo, la comisión de usuarios de riego Mariño, Abancay y Pachachaca, y la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Medio Apurímac Pachachaca -JUSHMAP-.

Cada sistema de riego, por lo general, se conforma con base en la captación de agua, un canal de conducción y distribución. Así mismo, disponen de cierta ramificación, integrando canales del mismo orden, o con estructura jerárquica entre el canal principal y los canales secundarios.

Los canales tienen revestimientos parciales y bocatomas en ciertas secciones. Los canales revestidos poseen eficientes sistemas de conducción. Los partidores, las bocatomas y la toma de agua a nivel de parcela son de tipo tarjeta (*on/off*). Son pocos los casos en que la regulación y el control hídrico se realizan a través de la colocación de piedras y “champas”³⁷.

Las condiciones topográficas influyen en el riego parcelario a nivel de la cuenca, así mismo, en ella se adaptan láminas de riego mayores a los requerimientos de los sembríos continuos, a causa del riego permanente suministrado al tipo de suelo y al clima zonal.

FIGURA 22. Canal Mariño



37 Las champas provienen del vocablo quechua, que significan porciones de tierra firme.

TABLA 10. Área de cultivo en la cuenca Mariño

Parte de la cuenca	Área bajo riego (ha)	Áreas en descanso (ha)	Áreas en secano (ha)	Áreas forestadas (ha)	Áreas eriazas (ha)	Total (ha)
Cuenca alta	1.918	740	180	620	1.650	5.108
Cuenca media	838			25	120	983
Total	2.756	740	180	645	1.770	6.091

Calendario agrícola y cédula de cultivos

Se denomina bloque o comité de riego a todas las parcelas que emplean una fuente común de agua superficial. Por lo tanto, la demanda de agua se ha estimado por tales bloques para cada unidad hidrográfica.

Las tierras con fines agrarios son trabajadas en parcelas familiares muy fraccionadas, cuya producción agrícola es de usufructo familiar, ello se da en función de los bloques de riego de la parte alta de las cuencas. De igual modo, las cédulas de cultivo se realizan a través de la información primaria de campo, durante 2017 y 2018.

Cabe mencionar que las cédulas de riego, en cada unidad hidrológica, se diversifican en uno o más cultivos, según cada sector de riego. Así mismo, existen variaciones en cuanto a la formación de sembríos, según las condiciones de agua, suelo, tierra y piso ecológico. Se realizó el inventario de las zonas de sembrío (cédula de cultivo) para establecer la demanda hídrica agraria. Enseguida, se evaluó la evapotranspiración potencial, haciendo uso del *software* CROPWAT, en función de la metodología de *Penman Monteith*.

TABLA 11. Evapotranspiración potencial en la cuenca del Mariño

Mes	Temp. mín.	Temp. máx.	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETO
	°C	°C	%	m/s	horas	MJ/m ² /día	mm/día
Enero	11,4	26,8	83	0,4	4,4	17,1	3,5
Febrero	11,5	22	84	0,4	4	16,2	3,17
Marzo	11,5	21,7	85	0,5	4,3	15,9	3
Abril	11,2	22,4	98	0,5	4,5	14,8	2,7
Mayo	10,1	22,9	80	0,5	5,3	14,4	2,58
Junio	9,1	22,3	77	0,6	5,7	14	2,44
Julio	8,6	22	76	0,6	6,1	14,9	2,53
Agosto	9,5	22,7	75	0,7	6,4	16,8	2,96
Septiembre	10,6	23,7	75	0,6	6,2	18,2	3,37
Octubre	11,4	24,5	75	0,5	6	19,2	3,66
Noviembre	11,6	24,8	77	0,6	6,5	20,3	3,94
Diciembre	11,4	23,4	80	0,0	4,3	16,9	3,31
Promedio	10,7	23,3	80	0,5	5,3	16,6	3,1

Requerimiento de agua

Se realizó la estimación hídrica a nivel de bloques de riego, en la cuenca alta y media del río Mariño. De igual manera, se evaluó la demanda de riego por los sembríos mediante los datos registrados en la cédula de cultivo en la zona de vida Mariño. En la actualidad, las demandas de agua superficiales llevan un registro contable, que conciernen a la zona de riego total en cada bloque del mismo. Los valores de padrón de usuarios en los comités de riego en cada sector del mismo, tienen una relación directa con el área bajo riego.

TABLA 12. Demanda de agua para riego en la cuenca alta del río Mariño

Descripción	Cédula	Período				
	ha	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV
Papa (<i>solanum tuberosum</i>)	569		0,28	0,28	0,42	0,63
Maíz (<i>zea mayz</i>)	211				0,48	0,50
Tarwi	73				0,33	0,67
Hortalizas	32				0,65	0,56
Hortalizas general	36	1,00	1,09	1,00		
Arveja verde (<i>pisum sativum</i>)	87	1,00	1,00			
Haba verde (<i>vicia faba</i>)	112	0,83	0,87	0,70		
Maíz (<i>zea mayz</i>)	95		0,28	0,28	0,42	0,63
Coliflor (<i>brassica oleracea var, botrytis</i>)	5	1,00				
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	515	0,83	0,50	0,33	0,33	0,33
Rye grass (<i>lolium multiflorum</i>)	95	0,85	0,77	0,77	0,77	0,77
Frutales	73	0,88	0,88	0,75	0,75	0,75
Ciruelo (<i>prunus domestica</i>)	15	0,88	0,88	0,75	0,75	0,75
Área	1.918	938	1,597	1,510	1,678	1,678
		77%	132%	125%	138%	138%
Kc ponderado		0,86	0,51	0,40	0,44	0,54
Días por mes	días	31	31	30	31	30
ETP promedio mensual	mm	83,39	96,10	103,50	116,87	119,70
ETR (consumo)	mm	71,71	49,20	41,77	51,13	64,18
Precipitación efectiva	mm	9,80	13,70	21,90	44,80	53,30
Demanda unitaria neta	m ³ /ha	619,08	355,05	198,72	63,32	108,84
Eficiencia del sistema	%	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
Demanda bruta de agua	m ³ /ha	1,146	657	368	117	202
Volumen requerido por mes	m ³	1,841,737	1,055,865	591,413	188,031	324,634
Caudal	l/s	687,63	394,21	228,17	70,20	125,24

DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
0,79	0,83	0,75	0,61	0,52	0,33	
0,88	1,00	0,88	0,76	0,75		
1,00	1,00	0,67	0,36	0,74		
0,75	1,00	0,94	0,71			
				0,66	0,50	
					0,50	1,00
					0,32	1,00

0,79	0,83	0,75	0,61	0,52	0,33	0,67
		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,33	0,33	0,67	0,92	0,92	0,92	0,92
0,77	0,77	0,77	0,85	0,85	0,85	0,85
0,88	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
0,88	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1,678	1,678	1,683	1,683	1,687	1,602	938
138%	138%	139%	139%	139%	132%	77%
0,67	0,71	0,76	0,75	0,73	0,60	0,90
31	31	28	31	30	31	30
109,74	102,92	88,20	94,55	90,60	87,11	80,40
73,76	72,85	66,76	70,90	66,00	52,42	72,48
75,00	104,40	102,40	90,30	38,30	13,10	8,30
				276,96	393,19	641,79
0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
				513	728	1,189
				824,442	1,169,969	1,910,842
				318,07	436,82	737,21

TABLA 13. Demanda de agua para riego en la cuenca media del río Mariño

Descripción	Cédula	Período				
	ha	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV
Maíz amiláceo duro	205				0,19	0,40
Cereales	124	0,93	0,87	0,54		
Maíz morado (<i>zea mayz</i>)	35					0,20
Frijol panamito (<i>phaseolus Sp.</i>)	78	1,00	0,89	0,67		
Frijol canario (<i>phaseolus Sp.</i>)	54				0,32	0,58
Papa	62	1,00	0,96	0,80		
Camote (<i>ipomoea batatas</i>)	5	0,75	1,05	1,00	0,50	
Tomate (<i>solanum lycopersicum</i>)	8	1,00	1,00	0,67		
Arveja verde	25	0,67	1,05	0,66	1,00	
Vainita (<i>phaseolus vulgaris</i>)	20	1,00	1,00	0,67		
Hortalizas	14	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33
Alfalfa	85	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Sorgo (<i>sorgum Sp.</i>)	4	0,50				
Palta (<i>persea americana</i>)	60	0,50	1,01	1,03	1,03	1,03
Frutales	35	1,00	1,00	1,00	0,93	0,87

Lucma (<i>pouteria lucuma</i>)	10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97
Ciruelo	14	0,88	0,88	0,75	0,75	0,75
ÁREA	838	544	540	540	507	512
		45%	45%	45%	42%	42%
Kc ponderado		0,89	0,92	0,75	0,55	0,49
Días por mes	días	31	31	30	31	30
ETP promedio mensual	mm	88,35	101,68	109,80	124,31	127,20
ETR (consumo)	mm	78,55	93,27	82,86	68,58	62,63
Precipitación efectiva	mm	9,80	13,70	21,90	44,80	53,30
Demanda unitaria neta	m ³ /ha	687,47	795,74	609,58	237,79	93,29
Eficiencia del sistema	%	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
Demanda bruta de agua	m ³ /ha	1,206	1,396	1,069	417	164
Volumen requerido por mes	m ³	445,496	515,682	394,889	154,040	60,582
Caudal	l/s	166,33	192,53	152,35	57,51	23,37

DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
0,70	0,90	0,65	0,40			
					0,30	0,47
0,50	0,80	0,80	0,80	0,80	0,40	0,40
					0,25	0,67
0,92	0,89	0,67				
					0,30	0,60
						0,37
					0,67	0,67
					0,74	0,74
					0,33	0,67
0,33	0,33	0,67	1,00	1,00	1,00	1,00
0,50	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,70
			0,25	0,75	0,88	0,75
1,03	1,03	0,97	0,88	0,80	0,50	0,65
0,80	0,80	0,80	0,80	0,87	0,93	1,00
0,90				0,49	0,74	1,00
0,88	0,88	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
512	502	502	452	257	574	579
42%	41%	41%	37%	21%	47%	48%
0,60	0,78	0,66	0,54	0,65	0,43	0,65
31	31	28	31	30	31	30
116,56	109,12	93,52	100,44	96,60	92,38	85,50
69,92	85,38	61,94	54,51	63,09	39,71	55,43

75,00	104,40	102,40	90,30	38,30	13,10	8,30
				247,91	266,09	471,27
0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
				435	467	827
				160,689	172,510	305,494
				61,99	64,41	117,86

TABLA 14. Requerimiento de agua para riego en la cuenca del río Mariño

Descripción	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Demanda de agua para riego en la cuenca alta				318,07	436,82	737,21
Demanda de agua para riego en la cuenca media				61,99	64,41	117,86
Demanda total (l/s)	0	0	0	380,06	501,23	855,07
Volumen total (m³)	0	0	0	985,116	1,342,494	2,216,341

JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
687,63	394,21	228,17	70,2	125,24	
166,33	192,53	152,35	57,51	23,37	
853,96	586,74	380,52	127,71	148,61	0
2,287,246	1,571,524	986,308	342,058	385,197	0

Requerimiento de agua para consumo comunitario

El Plan Maestro Optimizado de EMUSAP tomó los registros de conexiones de 4,26 habitantes por conexión en el área de administración de EMUSAP ABANCAY SAC:

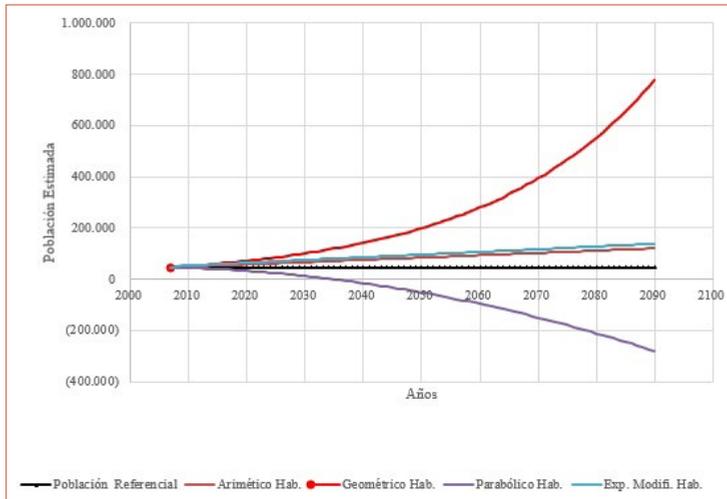
TABLA 15. Proyección poblacional de la ciudad de Abancay

Año	Tasa	Aritmético	Geométrico	Parabólico	Exponencial	Población
	Referencial				Modificado	Estimada
2007	45.864	45.864	45.864	45.864	45.864	45.864
2008	45.873	46.758	47.454	45.320	51.401	47.454
2009	45.882	47.651	49.099	44.693	52.455	49.099
2010	45.892	48.545	50.800	43.983	53.509	50.800
2011	45.901	49.438	52.561	43.190	54.563	52.561
2012	45.910	50.332	54.383	42.315	55.617	54.383

2013	45.919	51.225	56.268	41.357	56.671	56.268
2014	45.928	52.119	58.218	40.316	57.725	58.218
2015	45.937	53.012	60.236	39.192	58.779	60.236
2016	45.947	53.906	62.324	37.986	59.833	62.324
2017	45.956	54.799	64.485	36.697	60.887	64.485
2018	45.965	55.693	66.720	35.325	61.940	66.720
2019	45.974	56.586	69.032	33.870	62.994	69.032
2020	45.983	57.480	71.425	32.333	64.048	71.425

Fuente: Plan Maestro Optimizado II Quinquenio, EMUSAP, 2013 Abancay SAC.

FIGURA 23. Curvas de crecimiento poblacional en la ciudad de Abancay, 2018



Agua potable: estimación de la demanda

Bajo el ejercicio de ciertos parámetros, se determinó aproximadamente el número de conexiones:

- Número de personas por vivienda.
- Conexiones con una unidad de uso (sobre el total de conexiones).
- Conexiones con unidades de uso sobre la población servida, fijada de forma previa para cada comunidad.

TABLA 16. Proyección de conexiones totales de agua potable

Localidad	Tipo	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Abancay	Activas	11.678	11.916	12.160	12.410	12.666	12.930
	Inactivas	626	641	656	672	689	705
	Totales	12.304	12.557	12.816	13.082	13.355	13.635

Fuente: Plan Maestro Optimizado II Quinquenio, EMUSAP, 2013 Abancay SAC.

Proyección del volumen demandado de agua potable

A continuación, se presenta los resultados sobre el volumen de agua requerido por tipo de usuario y demanda total, que incluye las pérdidas técnicas estimadas:

TABLA 17. Proyección del volumen demandado de agua potable (m³/año) en la cuenca del Mariño

Ítems	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Consumo demandado	2.722.780	2.644.338	2.675.596	2.589.787	2.622.752	2.657.319
Facturados medidos	2.371.525	2.368.839	2.448.415	2.417.319	2.493.796	2.570.474
Facturados no medidos	351.256	275.499	227.181	172.468	128.956	86.845
Pérdidas no técnicas	352.298	328.490	334.181	323.926	331.569	339.269
Pérdidas técnicas	1.756.000	1.639.596	1.611.495	1.517.644	1.491.900	1.514.014
Demanda total	4.775.767	4.583.708	4.595.835	4.417.095	4.433.240	4.498.950

Fuente: Plan Maestro Optimizado II Quinquenio, EMUSAP, 2013 Abancay SAC.

6. Balance hídrico

Balance de agua para riego

Se estableció el balance de agua con fines de riego cuya demanda hídrica fue destinada para la cuenca alta y media, según la cédula de cultivo en cada área territorial; así mismo, se configuró la disponibilidad hídrica. En ese escenario, la oferta hídrica de riego se evidencia como se aprecia a continuación:

TABLA 18. Oferta hídrica en diferentes ecosistemas (m³/año)

Ecosistema	Parámetro	Lámina de agua (mm/año)	Volumen (m ³ /año)
Pastizal	Escorrentía	57,61	460.946
	Percolación	366,88	2.935.075
Bofedal	Escorrentía	61,81	15.454
	Percolación	681,5	170.376
Bosque nativo	Escorrentía	61,81	83.454
	Percolación	443,88	599.242
Total		1.673	4.264.549

TABLA 19. Balance oferta demanda de agua para riego en la cuenca alta y media del Mariño (m³/año)

Oferta- Volumen (m ³ /año)	Demanda- Volumen (m ³ /año)	Déficit- Volumen (m ³ /año)
4.264.549	4.503.587	- 239.038

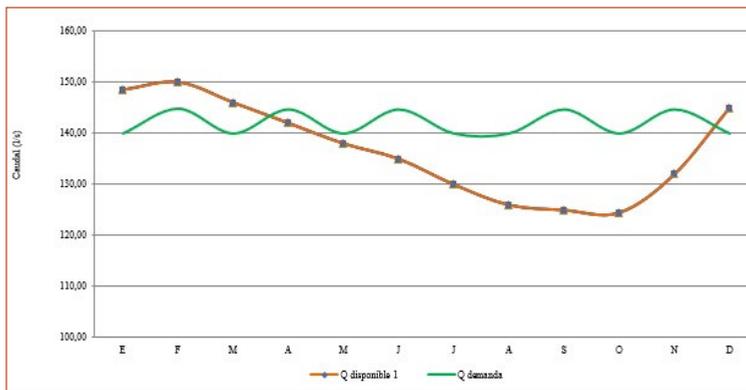
Como se aprecia en dicha tabla, existe un desabastecimiento de agua para riego de 239.038 m³/año, el cual se da en época de estiaje, cuya demanda es mayor en lo que se refiere al servicio de agua para riego, sobre todo en las localidades que se ubican en dicha cuenca.

Balance hídrico para uso poblacional

De acuerdo con la EMUSAP, 4.498.950 m³ es la cantidad que representa la demanda hídrica para fines domésticos; de igual manera para una población de 66.720 habitantes proyectada al 2018.

Balance hídrico						
Caudal (l/s)	80,52	50,21	60,02	-2,64	-1,98	-9,64
Volumen (m ³)	22.830,00	12.600,00	16.134,00	-6.848,00	-5.293,00	-24.993,00
	-9,98	-13,98	-19,64	-15,48	-12,64	50,02
	-26.721,00	-37.434,00	-50.913,00	-41.452,00	-32.769,00	13.456,00
						-
						-161,403,00

FIGURA 24. Balance de agua para consumo humano

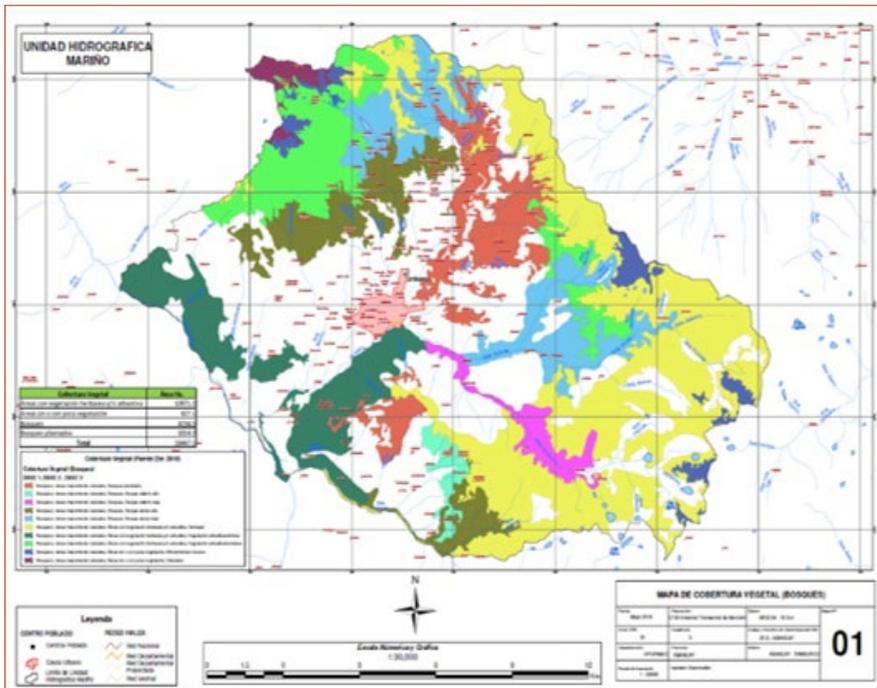


Se revela un déficit hídrico de 186.036 m³, habiendo un considerable estiaje (julio a noviembre), razón por la cual se racionaliza el agua destinada a las comunidades de la ciudad de Abancay.

7. Servicio ecosistémico de regulación hídrica en la cuenca alta y media del Mariño: potenciales proveedores

Suministro del servicio ecosistémico

Para el suministro de servicio de ecosistemas en materia hídrica, se tienen los resultados que permiten identificar y seleccionar determinadas áreas. Estas son detectadas al interceptar la data cartográfica de uso actual de la tierra (vegetación estable, bosques y cultivos) con diversidad de pendientes (ligera, moderada y fuerte). Por último, se priorizan las zonas de poca estabilidad, como las que presentan ciertas condiciones desfavorables en el uso de la tierra.

FIGURA 25. Mapa de cobertura vegetal en la cuenca del Mariño, 2018

Un punto de mayor relevancia sería mantener el revestimiento vegetativo en óptimas condiciones, sin intervención de actividades antrópicas como la agricultura o ganadería, lo que en cierta forma dicha cobertura se vería compensada para garantizar el funcionamiento natural de captación hídrica.

A saber, el agua es el recurso de mayor prioridad para abastecer las pendientes elevadas de erosión de los suelos o si estos presentan superficies insuficientes de cobertura vegetal.

Proveedores potenciales del servicio de ecosistemas de regulación hídrica en la parte alta y media de la cuenca Mariño

Se utilizó la encuesta para recopilar información sobre los proveedores encargados de tal labor. La unidad de análisis de la encuesta se conforma por las familias productoras de las diferentes comunidades.

TABLA 22. Potenciales proveedores del servicio ecosistémico en la cuenca del Mariño

Cuenca	Distrito	Comunidad	Población
Mariño	Abancay	Micaela Bastidas	168
	Abancay	Atumpata	226
	Abancay	Marcuyoc	58
	Abancay	Chuyllurpata	38
	Abancay	Aymas Alto	46
	Tamburco	LlañucanCHA	65

Tenencia del suelo

La superficie promedio de cada unidad agrícola productiva se evidencia en la Tabla 23, en función del tipo de tenencia de la tierra a nivel de la cuenca alta y media del río Mariño.

TABLA 23. Régimen de tenencia de la tierra en la cuenca alta y media de Mariño (promedio en ha)

Cuenca alta y media	Tipos de tenencia				Promedio
	Propia	Alquilada	Cedida	Al partir	
Mariño	1,60	0,12	0,42	0,09	2,23

Cabe mencionar que los productores tienen en promedio 2,23 ha, la tenencia de la tierra predominante es la propia con un promedio de 1,60 ha (por agricultor). El 98% de los terrenos son comunales, cuyas áreas de mancomunidad son denominadas *laymes*, y se encuentran en la parte alta de la cuenca.

Uso de suelo

La cédula de cultivo o “pan llevar” se presenta como papa, maíz, alfalfa, haba, trigo, etc. El cultivo con mayor superficie de siembra es la papa (70,53%), luego maíz (14,27%) y alfalfa (9,38%).

TABLA 24. Superficie de cultivos y porcentaje de uso de suelo en la cuenca del Mariño

Cuenca	Cultivos y área y porcentaje						
	Papa	Maíz	Alfalfa	Trigo	Haba	Arveja	Otros
Mariño	173	35	23	6	3,8	2,5	2
	70,53	14,27	9,38	2,45	1,55	1,02	0,82

En la cuenca Mariño (media y alta) se cultiva la papa, la cual se siembra en los llamados *laymes*, luego, la alfalfa, el maíz y los demás cultivos se realizan en la cuenca media.

TABLA 25. Características productivas en la cuenca Mariño

Variables de caracterización	Mariño
Sistemas de labranza	Movilización excesiva del suelo
Prácticas de conservación de suelos en cuenca alta	Cercos vivos, <i>qochas</i> , terrazas de formación lenta, zanjas de infiltración y forestación con especies nativas
Sistemas hidráulicos agrícolas (canales o embalses)	Canal Mariño represa de Rontoqocha, Allpaccocha, Afilayoqccochoa
Fuente agua de uso agrícola	Precipitación
Tipo de agricultura	Secano
Superficie de pastos naturales	Escaso
Superficie de pastos cultivados	Con disponibilidad
Bosques nativos	En fragmentos y dispersos

Existe un sistema de labranza que causa un movimiento desmedido de tierras en los terrenos para la producción agropecuaria de la cuenca media y alta del río Mariño. Sin embargo, también se realizan prácticas agrícolas de conservación de agua y suelo. Los efectos benéficos de tales prácticas pueden no ser eficaces, dado que los sistemas de labranza más modernos trasladan una enorme cantidad de suelo, así mismo, la cobertura de pastos cultivados es escasa y la de bosques es dividida y esparcida.

Cultivos diversificados

El 65% de los proveedores del servicio de ecosistemas se dedican a la variedad de cultivos según la región y la estación, situación en la que se hace necesario el suministro variado de alimentos, dadas las condiciones agrícolas de subsistencia, gente en condiciones de extrema pobreza, sitios distanciados al mercado, etc.

Es importante para cada productor mitigar las pérdidas, sobre todo cuando no hay fuente de agua o es insuficiente, por lo que resulta difícil ajustar las superficies de siembra de los diferentes cultivos. Y es que el 72% de las unidades productivas tienen relación directa con el agua pluvial para regar (tierras de secano), y en un 28% de las parcelas agropecuarias tienen relación con el sistema de riego por aspersión y gravedad. En la actualidad, se vive momentos de incertidumbre en cuanto a la abundancia o escasez de agua pluvial, por lo que se vienen realizando obras hidráulicas de almacenamiento temporal de agua.

Rendimientos productivos

En la presente tabla se revela información estadística para el rendimiento de los cultivos esenciales en la cuenca bajo riego:

TABLA 26. Rendimientos productivos en la cuenca alta de Mariño (kg/ha/año) bajo riego

Variables	Rendimiento cultivos (Kg/ha/año)					
	Papa	Maíz	Alfalfa	Trigo	Haba	Arveja
Promedio	8770,1	358,99	1.253,33	879,11	876,56	543,74
n	17,00	45,00	3,00	102,00	12,00	34,00
DE	6.066,64	502,18	2.032,27	507,40	802,17	336,81
Máx.	23.000,00	2.600,00	3.600,00	2.760,00	2.300,00	1.840,00
Mín.	1.200,00	11,50	80,00	115,00	92,00	69,00

TABLA 27. Rendimientos productivos en la cuenca alta de Mariño (Kg/ha/año) en secano

Variables	Rendimiento de cultivos (Kg/ha/año)					
	Papa	Maíz	Alfalfa	Trigo	Haba	Arveja
Promedio	8.2800,00	221,50	s.d.	825,59	235,75	449,65
n	2,00	7,00	s.d.	35,00	2,00	10,00
DE	9.1070,54	148,35	s.d.	439,06	73,19	227,40
Máx.	14.720,00	460,00	s.d.	1.725,00	287,50	920,00
Mín.	1.8400,00	69,00	s.d.	103,50	184,00	57,50

Para determinar el rendimiento de cultivos, como el trigo, el maíz o la papa, se realizó la prueba T-STUDENT, con la que se corrobora si existen o no disimilitudes entre ellos, según el tipo de riego. La producción de papa y maíz tiene un resultado estadístico distinto, en comparación con el trigo ($p < 0,05$). En otras palabras, el rendimiento de trigo no se ve afectado por el tipo de riego.

Las estadísticas de rendimiento pueden variar para ciertos alimentos. Siendo la agricultura una actividad económica fundamental en la cuenca, esta tiene vital importancia con relación a su rentabilidad económica.

Se empleó el rendimiento promedio de la papa para su valoración económica. Así mismo, se analizó el rendimiento de maíz y trigo, no obstante, este último presenta un rendimiento promedio negativo por ser un cultivo de baja producción.

Ingresos económicos

Se efectuaron los cálculos respectivos en función de determinada información en la fase de campo. Así, solo la papa contribuyó con 75,9% a los ingresos de los productores agrícolas, luego, la ganadería con 19,2%, subproductos agrícolas (3,8%) y otros (1,1%).

TABLA 28. Rendimiento económico de la papa en secano en la cuenca del Mariño

Variables	Ingresos	Costos	Ganancia	Rendimiento económico
	S/.	S/.	S/.	(S/./ha/año)
Promedio	984,9	642,53	342.705	685,075
DE	541,36	466.655	649.565	1.299,13
Máx.	1.555.405	1.160,44	1.043,19	2.086,715
Mín.	478.715	254.935	-239,19	-478,715

TABLA 29. Rendimiento económico de la papa bajo riego en la cuenca del Mariño

Variables	Ingresos	Costos	Ganancia	Rendimiento económico
	S/.	S/.	S/.	(S/./ha/año)
Promedio	400,66	205.355	195,64	809,36
DE	312,89	11.055	302,17	1.172,165
Máx.	622.095	213,06	409.035	1.636,81
Mín.	179,56	197.315	-18,09	-18,09

TABLA 30. Rendimiento económico del maíz en secano en la cuenca del Mariño

Variables	Ingresos	Costos	Ganancia	Rendimiento económico
	S/.	S/.	S/.	(S/./ha/año)
Promedio	77,39	175,88	-98,16	-153,10
DE	71,02	129,65	114,91	141,37
Máx.	179,56	409,04	6,03	0,00
Mín.	0,00	41,88	-313,56	-418,08

TABLA 31. Rendimiento económico del maíz bajo riego en la cuenca del Mariño

Variables	Ingresos	Costos	Ganancia	Rendimiento económico
	S/.	S/.	S/.	(S/./ha/año)
Promedio	77,39	14,74	62,98	58,63
DE	72,70	20,77	93,47	99,83
Máx.	129,31	29,48	129,31	129,31
Mín.	26,47	0,00	-3,02	-12,06

Cabe añadir que, si el cultivo se planta en seco, la rentabilidad es negativa, esto es, si se somete al agua pluvial en contraste con un sistema bajo riego. No obstante, se necesitan de otros estudios para muestras más amplias.

8. Importancia económica del servicio de provisión hidrológica en la cuenca del río Mariño

Las evaluaciones ambientales y socioeconómicas se realizaron en la cuenca Mariño, unidad hidrográfica en la que se tuvo como objetivo valorar el servicio de suministro hidrológico y ponderar la importancia, en términos económicos, de los distintos ecosistemas estudiados.

Productores por captación de agua en los ecosistemas(beneficios)

Se tomaron en cuenta los ingresos como resultado de la faena agraria, para evaluar los ingresos provenientes de la productividad hídrica, esto de acuerdo con el tipo de superficie vegetativa.

TABLA 32. Ingresos por producción de papa bajo riego en la cuenca del Mariño

Cultivo	Año	Ingresos por producción agrícola (S/ha/año)
Papa	2019	809
	2020	749
	2021	694
	2022	642
	2023	595
	Total en 5 años	3.489

Si bien es cierto, cada ecosistema tiene propiedades particulares al hacer disponible el recurso hídrico. Evaluar la cobertura vegetal cobra mucho fuste, porque luego se determinará el aporte pecuniario en función del valor de captación de agua por los ecosistemas. Tal cobertura y los ecosistemas de montaña son los principales proveedores de agua al evaluarse su valor en un 86%. De igual manera, la conservación de tales ecosistemas influye sobremanera en los procesos de infiltración y disminución de escorrentía.

Para estimar su valor de captación, es menester fijar el área de interés hídrico en la cuenca, y es que en tales zonas de vida se visualizan superficies vegetativas donde albergan especies de distintos tipos, los cuales intervienen para proteger y suministrar el servicio ambiental hídrico. La tasación se basó en el diseño del mapa de cobertura vegetal de la cuenca Mariño, empleando el *software* Arc Gis 9.9, con el que se demarcó el área para los ecosistemas de bofedal, pastizal y bosque nativo.

TABLA 33. Áreas por ecosistema en la cuenca del Mariño

Tipo de ecosistema	Área de importancia hidrológica (ha)	Área por recuperar en la zona de importancia hídrica (ha)
Pastizal	800	60
Bofedal	200	15
Bosque nativo	135	22

El volumen de agua disponible fue analizado a fin de calcular el valor de captación de agua por los ecosistemas. Para ello se empleó el CUBHIC, que identificó valores como la condición actual de suelo, la cobertura vegetal, el coeficiente (altitud/latitud), suelo profundo, coeficiente de escorrentía, área de intervención (ha), etc. De igual modo, se utilizaron valores meteorológicos esenciales (temperatura máxima-mínima diaria y precipitación media diaria en mm) en el lapso de un año. El valor de captación hídrica es vital para tasar el valor económico real del agua.

TABLA 34. Valor de captación de agua

Tipo de Ecosistema	Costo de oportunidad de la actividad que compite con la cobertura vegetal (S/ha/año)		Área de importancia hidrológica (ha)	Volumen de agua producida por el ecosistema (m ³ /año)	Importancia de la cobertura vegetal	Valor de captación de la cobertura vegetal (S/m ³)
Pastizal	2019	809	800	3.396.021	0,86	0,16
	2020	749	800	3.396.021	0,86	0,15
	2021	694	800	3.396.021	0,86	0,14
	2022	642	800	3.396.021	0,86	0,13
	2023	595	800	3.396.021	0,86	0,12
	Total	3.489				0,71
	Promedio					
Bofedal	2019	809	200	185.831	0,86	0,75
	2020	749	200	185.831	0,86	0,69
	2021	694	200	185.831	0,86	0,64
	2022	642	200	185.831	0,86	0,59
	2023	595	200	185.831	0,86	0,55
	Total	3.489				3,23
	Promedio					
Bosque nativo	2019	809	135	685.697	0,86	0,14
	2020	749	135	685.697	0,86	0,13
	2021	694	135	685.697	0,86	0,12
	2022	642	135	685.697	0,86	0,11
	2023	595	135	685.697	0,86	0,10
	Total	3.489				0,59
	Promedio					

En la Tabla 35 se muestran los valores de captación obtenidos, aplicando la fórmula 68, que consiste en multiplicar el costo de oportunidad de la actividad que compite con la cobertura vegetal, el valor de la importancia de la cobertura vegetal y el área bajo cobertura vegetal, luego el resultado se divide entre el volumen de agua captada en la cuenca. Estos valores se fijaron con base en los tres ecosistemas que se estudiaron y compararon en la cuenca alta del Mariño.

Por un lado, el pastizal y el bosque nativo contribuyen en extremo en el tema de la producción hídrica; por otro, el bofedal origina la producción de agua mínima, no obstante, este ecosistema revela mayor valor de captación, el cual es de $S/ 0,75/m^3$.

TABLA 35. Valor promedio de captación de agua por la cobertura vegetal de la cuenca Mariño (S/año)

Clases de ecosistema	Año	Volumen de agua producida por el ecosistema ($m^3/año$)	Valor de captación de la cobertura vegetal (S/m^3)	Valor promedio de captación de agua por la cobertura vegetal (S/año)
Pastizal	2019-2023	3.396.021	0,14	480.019
Bofedal	2019-2023	185.830	0,65	120.004
Bosque nativo	2019-2023	685.697	0,12	81.003

Las áreas geográficas de pastizal y bofedal tienen un valor superior de captación hídrica en contraste con el bosque nativo, y es que los organismos y especies de este último tienden a crecer muy lento, y sus bondades a nivel de ecosistema tienen un efecto tardío.

De no presentar similares valores de captación hídrica por cada ecosistema, deberán ser tratados de forma integral para no descuidar los beneficios hidrológicos y sus respectivos balances en cuanto a los servicios que brindan.

Cobertura vegetal (valor de restauración)

El valor de restauración de la cabecera de cuenca del río Mariño genera costos anuales necesarios para recuperar las áreas despobladas o degradadas, esto conlleva tareas de campo como la reforestación, conservación de bofedales, clausura de praderas, revegetación con pastos nativos, etc., no obstante, tiene que pasar cinco años aproximadamente para ver luego los resultados deseados.

Cobertura vegetal mediante clausura de praderas (recuperación)

Al cercar áreas de ecosistemas, se propicia la clausura de praderas. Ecosistemas como el bofedal y pajonal de puna tuvieron un impacto negativo tras diversas actividades, como el sobrepastoreo, praderas calcinadas, agricultura desmedida, etc.

Reforestación de áreas degradadas con especies nativas

Las especies nativas cumplen un rol importante en la recuperación de la cobertura vegetal, puesto que permiten conservar las zonas de vida que fueron afectadas por la degradación. En efecto, la keuña (*polylepis incana*) es una de ellas, pues permiten interceptar precipitaciones, disminuir la escorrentía e incrementar la infiltración. Tal especie reside en la zona de Rontoccocha, donde el clima y el factor edafológico contribuyen en su desarrollo.

Pastos nativos

La ganadería causa, entre otras actividades por el uso de la tierra, la degradación de los recursos naturales, máxime, el sobrepastoreo y compactación de los suelos. Por ejemplo, la labor de siembra de *stipa ichu* restaura con eficacia la superficie vegetativa en la cabecera de cuenca, como los pastizales, lo cual implica elaborar costos de instalación, producción y protección de la actividad de revegetación.

TABLA 36. Ecosistemas de la cuenca Mariño (S/m³)/valor de restauración

Ecosistema	Costo de la actividad destinada a la recuperación de la cobertura vegetal (S/ha/año)	Área a recuperar en la zona de importancia hídrica (ha)	Volumen de agua producida por el ecosistema (m ³ /año)	Importancia de la cobertura vegetal	Valor de restauración de la cobertura vegetal (S/m ³)
Pastizal	3.459	60	3.396.021	0,86	0,05
Bofedal	3.108	15	185.830	0,86	0,22
Bosque nativo	4.534	22	685.697	0,86	0,13

Valor del agua

El valor del agua se mide por cada elemento diferenciador en función de su valoración económica. Por ejemplo, los ecosistemas estudiados, los cuales tienen especies diversas que conforman la biodiversidad funcional. Estas contribuyen sobremanera en la mejora de los servicios en materia hídrica que conceden una mayor recarga del acuífero, por lo tanto, una mayor oferta del agua.

TABLA 37. Valor del agua en la cuenca Mariño S./m³

Elementos	Tipo de ecosistema		
	Pastizal	Bofedal	Bosque nativo
Valor de captación	0,14	0,65	0,12
Valor de recuperación	0,05	0,22	0,13
Valor real del agua	0,09	0,43	-0,01

Se efectuó una diferencia entre los valores de captación y recuperación en una primera etapa, para luego fijar el valor del agua por componente y por ecosistema. Por ejemplo, el ecosistema de pastizal presenta un valor de captación de S/ 0,14/m³ y para el valor de recuperación de S/ 0,05/m³. Por lo que se obtiene una diferencia de S/ 0,09/m³, lo que viene a ser el valor real del agua. Similar procedimiento se realiza para los demás ecosistemas.

Para beneficio de los usuarios del agua, el valor real de este recurso para la segunda fase es de S/ 0,52 /m³, el cual se obtiene sumando los valores reales del agua, dato que figura en mayor proporción de lo que cobra la JUSHMAP, que en la actualidad es de S/ 0,0014/m³, por lo que el agua está subvalorada, y es que se cobra por el servicio brindado y se obvia su costo en la producción (cuenca Mariño), cuyo contexto exige la protección de sus respectivos ecosistemas.

CONCLUSIONES

Este interesante texto nos revela que, en los tres ecosistemas estudiados con relación a su biodiversidad funcional, el valor del agua varía de $S/ 0,09/m^3$, $S/ 0,43/m^3$ y $S/ 0,00/m^3$. Así mismo, estas zonas de vida se caracterizan por albergar gran variedad de organismos y especies vegetales, los cuales permiten una amplia interceptación y captación hídrica, mitigan la escorrentía y aumentan el drenaje de infiltración-percolación hídrica en vías subterráneas, ello, siempre y cuando, dichos ecosistemas se mantengan saludables, así mismo, producen una oferta hídrica con creces en las fuentes primigenias de agua.

Desde una perspectiva económica, los mencionados ecosistemas producen un enorme valor de captación de agua, exceptuando el del bosque nativo, debido a que sus especies, como *polylepis sp*, crecen muy lento y, por ende, su aprovechamiento hídrico tiene un efecto tardío.

Además, se concluye que el volumen de la oferta del agua se halló gracias al método CUBHIC. Esta información permitió fijar el valor del agua por cada ecosistema, sumándose el modelo empleado que sirvió para darle valor a cada ecosistema en términos de productividad del agua, teniendo claras las condiciones fisiográficas.

Por último, concluimos que es económicamente más rentable conservar el bofedal, bajo el prisma de la productividad del agua, el cual alberga a multitud de organismos y especies vegetales, incluyendo las *biocrusts*, produciendo un mayor valor del agua, que fluctúa entre $S/ 0,55/m^3$ y $S/ 0,75/m^3$.

RECOMENDACIONES

- La biodiversidad de especies de las superficies vegetativas que se encuentran en los ecosistemas estudiados, es la matriz fundamental de producción hídrica, la que permite conservar de manera íntegra la calidad y cantidad de agua en superficies de recarga acuífera que pertenecen a la cuenca alta y media del río Mariño.
- Se recomienda que EMUSAP, JUSHMAP y las organizaciones o comunidades nativas de Micaela Bastidas y Hatumpata, así como el Estado y demás entidades pertinentes protejan y conserven dichos ecosistemas a efectos de mantener y, por qué no, mejorar la calidad-producción de agua.

- También es recomendable utilizar estrategias con soporte tecnológico que aporten a favor de los ecosistemas, sobre todo a regular el flujo y reflujo hídrico, y a captar las aguas en el ecosistema y las que preservan el suelo.
- Se sugiere fomentar prácticas productivas de uso y ambientalización que favorezcan los entornos ambientales evaluados. La finalidad es recuperar la cobertura vegetal, conservar los bofedales y ejercer la reforestación con especies nativas, como *polylepis racemosa*.
- Por último, se recomienda investigar a profundidad sobre la eficiencia de uso del agua con fines poblacionales y agrícolas, puesto que todavía hay usuarios que no tienen el menor concepto, manejo y conservación de este preciado recurso.

CAPÍTULO CUARTO

Una breve mirada panorámica sobre la importancia del agua y los ecosistemas

En el Perú existe una riqueza admirable tanto en biodiversidad como en recursos naturales interminables, no obstante, en las últimas décadas se ha generado cierta preocupación por un elemento que cobra mucha importancia y compete a todos los que se benefician de él: el agua. Existe un sinnúmero de factores adversos que limitan su uso, empezando por el cambio climático y la elevada temperatura, la degradación de los ecosistemas en razón del sobrepastoreo, la deforestación, los cambios constantes del suelo, la contaminación de las aguas superficiales y de los acuíferos, las industrias alimentarias, las aguas residuales no tratadas, pérdida de bofedales como resultado de la ganadería, la mala praxis agrícola, relaves mineros, residuos sólidos, diversos líquidos altamente contaminantes y una población que cada día viene aumentando de forma considerable. Todo lo mencionado repercute en detrimento de la calidad del agua. A ello le sumamos su uso irracional tanto de las empresas como de la sociedad, dado que enormes cantidades de agua se pierden, en su gran mayoría, de forma innecesaria, y, lo peor, la devuelven contaminada.

La escasez del agua es, en la actualidad, un tema preocupante por la complejidad de su naturaleza y resultado, muchas veces, de la mala praxis en su distribución nacional, contrarrestando los esfuerzos que se realizan hacia su desarrollo sostenible.

Enfatizamos el tema del cambio climático, pues este ha y sigue generando un serio perjuicio, aumentando con creces la temperatura, causando el derretimiento de más del 50 % de los glaciales tropicales de Perú. Ello ha generado largas sequías en cadena, exponiendo las áreas verdes en constante peligro, echando a perder los diferentes cultivos y producciones agrícolas, permitiendo la aparición de enfermedades y hambruna a los pobladores debido a la falta de alimentos. En definitiva, la escasez de agua tiene múltiples efectos negativos que laceran en gran medida la economía del país, aumenta exponencialmente las desigualdades y los conflictos sociales.

Ante esta situación, es importante desarrollar modelos de negocio que aborden el tema de manera idónea, así mismo, construir una infraestructura que facilite, tanto a los inversores de entidades estatales como del sector privado, los recursos necesarios para la protección de los ecosistemas, propiciando a su vez una mayor rentabilidad. La inversión en proyectos que favorezcan el mantenimiento y abastecimiento del recurso hídrico, permitirá superar los impases generados por factores exógenos y actividades antrópicas que van con frecuencia en contra del medio ambiente.

Es menester tomar conciencia que la vida humana depende del agua, que bajo tierra se emplea para el riego, las actividades agrícolas y la industria. Es importante entender que el agua subterránea proporciona agua potable y está vinculada de manera directa a ecosistemas acuáticos saludables, calidad de vida y seguridad alimentaria para las personas que trabajan en ella encuentran su sustento, como para los usuarios urbanos que pagan por el servicio.

Los efectos benéficos del agua subterránea son imprescindibles para la salud humana, para lograr un desarrollo sostenible a largo plazo y estar atentos a los retos globales como el cambio climático. No obstante, este esencial recurso aún no es valorado a la altura de las circunstancias, debido a la poca importancia que se ha tenido sobre temas de carácter ambiental, social y económica, partiendo desde el Estado y sus instituciones hasta la gran mayoría de usuarios que no colaboran, en razón de que no toman conciencia ni las mejores decisiones, o presentan capacidades deficitarias como resultado de una actitud indiferente del tema y/o por su falta de preparación/gestión.

Mediante una gestión integrada del agua, los procesos de adaptación buscan cuidar, conservar y recuperar los ecosistemas a fin de garantizar sus servicios ecosistémicos. Así mismo, se considera la gestión sostenible del agua subterránea, la salud de los ecosistemas y su biodiversidad, con el objeto de proteger las zonas de recarga hídrica, entre otras medidas de adaptación.

Proteger los ecosistemas resulta capital, porque cumplen un rol fundamental vinculado al revestimiento vegetativo y sus procesos funcionales, como el ciclo hidrológico, los servicios de agua y demás labores que deben practicarse y tener el apoyo de entidades, como la Junta de Usuarios del Sector Hidráulico Medio Apurímac Pachachaca -JUSHMAP-, la Empresa Municipal de Servicios de Agua Potable y Saneamiento -EMUSAP- y las comunidades nativas de Micaela Bastidas y Hatumpata.

La biodiversidad funcional, en función de su valoración económica, es crucial, puesto que se evalúa de acuerdo con las investigaciones realizadas en forma previa sobre las particularidades que presenta la cobertura vegetal, la detección de ámbitos de recarga hídrica y el estudio de las diferentes especies que se ubican en la cuenca del río Mariño.

A rasgos generales, el problema ambiental en las últimas décadas ha generado mucha controversia, es un debate de nunca acabar, cuya relevancia mediática siempre ha tenido un efecto hueco, o tocan con cortapisas el tema en los círculos educativos, y apenas un vago pronunciamiento en la conciencia de los ciudadanos y grupos de presión.

En la actualidad debemos saber el grado de importancia que tiene la biodiversidad, puesto que incide de forma directa en el funcionamiento de los ecosistemas. Pero, ¿por qué son tan relevantes los ecosistemas? Una respuesta que mejor se ciñe a dicha interrogante, es por el contenido de múltiples especies beneficiosas que contienen, la identidad y características de estas pueden influir en un acelerado o lento proceso de los servicios ecosistémicos que, a la postre, generan para nuestra supervivencia.

En esa línea, las especies son fundamentales para el correcto funcionamiento de los procesos, no obstante, todo va a depender de su adecuada supervisión y mantenimiento, ya que su pérdida puede acarrear situaciones adversas difíciles de predecir, debido a la complejidad de los ecosistemas. Por ello, es imprescindible evitar su extinción, generada muchas veces por diversos factores, como la ausencia o pérdidas de hábitat o las presiones de carácter externo como la sobreexplotación de la tierra o el comercio lícito e ilícito, que repercuten de

manera negativa en ciertos grupos de especies. El menudo detalle es que la desaparición de estas puede acelerarse, sin estar al unísono con el conocimiento que demanda tiempo en estudiarlas, lo que atenta con la capacidad de dar una solución óptima al respecto.

Es lamentable que la mayoría de los humanos ignoren el tema de la crisis ambiental, los intercambios energéticos que mantenemos con los ecosistemas mediante elementos bióticos-abióticos. Así mismo, las sociedades modernas se han desarrollado a través de la selección de ciertas especies para sus propios intereses económicos, lo cual contraviene con todas las posibilidades y beneficios que nos ofrece la vida y su entorno ecológico, lo que ha obligado, incluso, a la destrucción de diversos ecosistemas para generar monocultivos y otras actividades comerciales.

Cabe mencionar que los temas de diversidad hídrico-funcional son materia de investigación por los estudiantes y todo aquel que desee complementar la vasta información que refiere a los ecosistemas y su biodiversidad, como el que se realizó en la cuenca del río Mariño mediante un balance hídrico, lo que puso de relieve el déficit hídrico que hay en la actualidad a causa de los factores externos mencionados y las actividades propiciadas por el hombre. Por ello, resulta de suma importancia tomar todas las acciones pertinentes para conservar, depurar y distribuir el agua de manera correcta, asegurar una cobertura vegetal saludable y, por ende, una mayor infiltración y disponibilidad en materia hídrica con el fin de cubrir las diferentes demandas.

BIBLIOGRAFÍA

- BARRANTES MORENO, GERARDO. “Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas”, *Revista Lebret*, n.º 2, 2010, pp. 131 a 160, disponible en [<http://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/LEBRET/article/view/668>].
- BARTKOWSKI, BARTOSZ; NELE LIENHOOP y BERND HANSJÜRGENS. “Capturing the complexity of biodiversity: a critical review of economic valuation studies of biological diversity”, *Ecological Economics*, vol. 113, 2015, pp. 1 a 14.
- BONNESOEUR, VIVIEN; BRUNO LOCATELLI, MANUEL R. GUARIGUATA, BORIS F. OCHOA-TOCACHI, VEERLE VANACKER, ZHUN MAO, ALEXIA STOKES y SARAH-LAN MATHEZ-STIEFEL. “Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: a systematic review”, *Forest Ecology and Management*, vol. 433, 2019, pp. 569 a 584.
- CALLES HERNÁNDEZ, JOSÉ RICARDO. “El valor del agua que producen los bosques y cafetales en la subcuenca del río Acelhuaté”, *Entorno*, n.º 56, 2014, pp. 58 a 68, disponible en [<https://www.camjol.info/index.php/entorno/article/view/6264>].
- CHAMIZO, SONIA; YOLANDA CANTÓN, EMILIO RODRÍGUEZ CABALLERO y FRANCISCO DOMINGO. “Biocrusts positively affect the soil water balance in semiarid ecosystems”, *Ecohydrology*, vol. 9, n.º 7, 2016, pp. 1.208 a 1.221.
- CHAPIN, F. STUART, PAMELA A. MATSON y PETER M. VITOUSEK. *Principles of terrestrial ecosystem ecology*, Nueva York, Springer, 2002.

- CHETTRI, NAKUL; EHSAN DULLOO, ANDREW HENDRY, BARDUKH GABRIELIAN, JULIAN GUTT, UTE JACOB, EMRE KESKIN, AIDIN NIAMIR y BAYRAM ÖZTÜRK. “Status and trends – nature”, en INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES (ed.). *The Global Assessment of Biodiversity and Ecosystem Services*, París, IPBES, 2019.
- CUADRADO BARRETO, GERARDO ARIOLFO; EDISON FERNANDO CAMPOS COLLAGUAZO y ARGENIS LISSANDER HEREDIA CAMPAÑA. “Valoración económica del servicio de producción hídrica de la microcuenca del río Blanco”, *SATHIRI: Sembrador*, vol. 13, n.º 2, 2018, pp. 168 a 177, disponible en [<https://revistasdigitales.upec.edu.ec/index.php/sathiri/article/view/763>].
- CUÉLLAR, IVÁN. *Fitocolonización en la zona periglaciaria del glaciar Conejeras, en el volcán Nevado de Santa Isabel - proyecto piloto*, Bogotá, IDEAM, 2017.
- CUESTA, FRANCISCO; PRISCILLA MURIEL, LUIS DANIEL LLAMBÍ, STEPHAN HALLOY, NIKOLAY AGUIRRE, STEPHAN BECK, JULIETA CARILLA, ROSA ISELA MENESES, SOLEDAD CUELLO, ALFREDO GRAU, LUIS E. GÁMEZ, JAVIER IRAZÁBAL, JORGE JÁCOME, RICARDO JARAMILLO, LIREY RAMÍREZ, NATALIA SAMANIEGO, DAVID SUÁREZ, NATALI THOMPSON, ALFREDO TUPAYACHI, PAUL VIÑAS, KARINA YAGER, MARÍA T. BECERRA, HARALD PAULI y WILLIAM D. GOSLING. “Latitudinal and altitudinal patterns of plant community diversity on mountain summits across the tropical Andes”, *Ecography*, vol. 40, n.º 12, 2017, pp. 1.381 a 1.394, disponible en [<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ecog.02567>].
- DANIELS, SILVIE; J. RYAN BELLMORE, JOSEPH R. BENJAMIN, NELE WITTERS, JACO VANGRONSVELD y STEVEN VAN PASSEL. “Quantification of the indirect use value of functional group diversity based on the ecological role of species in the ecosystem”, *Ecological Economics*, vol. 153, 2018, pp. 181 a 194.

- DAVIDSEN, CLAUDIUS; SUXIA LIU, XINGGUO MO, PETER E. HOLM, STEFAN TRAPP, DAN ROSBJERG y PETER BAUER GOTTWEIN. “Hydroeconomic optimization of reservoir management under downstream water quality constraints”, *Journal of Hydrology*, vol. 529, 2015, pp. 1.679 a 1.689.
- DEEB, ALEJANDRO. *Estimación de cambios en la respuesta hidrológica*, Bogotá, DNP-PAFC-BID, 1992.
- DENEVAN, WILLIAM M. *Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes*, Oxford, Oxford University Press, 2001.
- DÍAZ, SANDRA; JOSEPH FARGIONE, F. STUART CHAPIN III y DAVID TILMAN. “Biodiversity loss threatens human well-being”, *Plos Biology*, vol. 4, n.º 8, 2006, pp. 1.300 a 1.305, disponible en [<https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.0040277>].
- DUQUE, ÁLVARO; PABLO R. STEVENSON y KENNETH J. FEELEY. “Thermophilization of adult and juvenile tree communities in the northern tropical Andes”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, n.º 34, 2015, pp. 10.744 a 10.749, disponible en [<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1506570112>].
- FISHER, BRENDAN; R. KERRY TURNER y PAUL MORLING. “Defining and classifying ecosystem services for decision making”, *Ecological Economics*, vol. 68, n.º 3, 2009, pp. 643 a 653.
- FOSTER, MICHAEL E.; DAVID CHEN y MARK S. KIESER. *Metodologías CUBHIC: restauración y conservación de pastizales altoandinos*, Forest Trends, marzo de 2020, disponible en [<https://www.forest-trends.org/wp-content/uploads/2020/02/CUBHIC-Restauraci%C3%B3n-y-Conservaci%C3%B3n-de-Pastizales-Altoandinos-.pdf>].
- GAMFELDT, LARS; HELMUT HILLEBRAND y PER R. JONSSON. “Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning”, *Ecology*, vol. 89, n.º 5, 2008, pp. 1.223 a 1.231.

GAO, FENG; CRYSTAL B. SCHAAF, ALAN H. STRAHLER, ANDREAS ROESCH, WOLFGANG LUCHT y ROBERT DICKINSON. “MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo Climate Modeling Grid products and the variability of albedo for major global vegetation types”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 110, n.º D1, 2005, pp. 1 a 13, disponible en [<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2004JD005190>].

GLOBAL WATER PARTNERSHIP. “Integrated water resources management”, *TAC Background Paper*, n.º 4, Estocolmo, Global Water Partnership, 2000, disponible en [<https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/04-integrated-water-resources-management-2000-english.pdf>].

HAROU, JULIEN J.; MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ, DAVID E. ROSENBERG, JOSUÉ MEDELLÍN AZUARA, JAY R. LUND y RICHARD E. HOWITT. “Hydro-economic models: concepts, design, applications, and future prospects”, *Journal of Hydrology*, vol. 375, n.ºs 3 y 4, 2009, pp. 627 a 643, disponible en [<https://watershed.ucdavis.edu/shed/lund/papers/JulienHydroEcon2009.pdf>].

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA. *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*, Lima, INEI, 2018, disponible en [<http://censo2017.inei.gob.pe/poblacion-del-departamento-de-apurimac-totalizo-405-mil-759-personas-al-2017/>].

KRAGT, MARIT ELLEN; DAVID J. PANNELL, ALISTAIR STOTT, ALISTAIR MCVITTIE, BOUDA VOSOUGH AHMADI y P. WILSON. “Improving interdisciplinary collaboration in bio-economic modelling for agricultural systems”, *Agricultural Systems*, vol. 143, 2016, pp. 217 a 224.

LLAMBÍ, LUIS D.; MARÍA TERESA BECERRA, MANUEL PERALVO, ANDRÉS AVELLA, MARTÍN BARUFFOL y LIZ J. DÍAZ. “Monitoring biodiversity and ecosystem services in Colombia’s high andean ecosystems: toward an integrated strategy”, *International Mountain Society*, vol. 39, n.º 3, 2019.

- MOMBLANCH, ANDREA; JEFFERY D. CONNOR, NEVILLE D. CROSSMAN, JAVIER PAREDES ARQUIOLA y JOAQUÍN ANDREU. “Using ecosystem services to represent the environment in hydro-economic models”, *Journal of Hydrology*, vol. 538, 2016, pp. 293 a 303.
- PRIESTLEY, C. H. B. y R. J. TAYLOR. “On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters”, *Monthly Weather Review*, vol. 100, n.º 2, 1972, pp. 81 a 92, disponible en [https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/100/2/1520-0493_1972_100_0081_otaosh_2_3_co_2.xml].
- NEITSCH, SUSAN L.; JEFF G. ARNOLD, J. R. KINIRY y J. R. WILLIAMS. *Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2009*, Texas Water Resources Institute, 2011, disponible en [<https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/128050>].
- PRODERN. *Mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos*, Lima, 2018.
- RANDALL, ALAN. “Property entitlements and pricing policies for a maturing water economy”, *The Australian Journal of Agricultural Economics*, vol. 25, n.º 3, 1981, pp. 195 a 220, disponible en [<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1467-8489.1981.tb00398.x>].
- RODRÍGUEZ CABALLERO, EMILIO; ANTONIO J. CASTRO, SONIA CHAMIZO, CRISTINA QUINTAS SORIANO, MARINA GARCÍA LLORENTE, YOLANDA CANTÓN y BETTINA WEBER. “Ecosystem services provided by biocrusts: from ecosystem functions to social values”, *Journal of Arid Environments*, vol. 159, 2018, pp. 45 a 53.
- TAHER KAHIL, MOHAMED; JOSÉ ALBIAC, ARIEL DINAR, ELENA CALVO, ENCARNA ESTEBAN, LORENZO AVELLA y MARTA GARCÍA MOLLA. “Improving the performance of water policies: evidence from drought in Spain”, *Water*, vol. 8, n.º 34, 2016, pp. 1 a 15, disponible en [<https://www.mdpi.com/2073-4441/8/2/34/htm>].
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *National Engineering Handbook: Part 630 – Hydrology*, Washington, D. C., Soil & Water Assessment Tool, 2019.

VARELA ORTEGA, CONSUELO; IRENE BLANCO GUTIÉRREZ, CHRISTOPHER H. SWARTZ y THOMAS E. DOWNING. “Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: an integrated hydro-economic modeling framework”, *Global Environmental Change*, vol. 21, n.º 2, 2011, pp. 604 a 619.

ZHANG, WEI; MOHAMMAD EHSAN DULLOO, GINA KENNEDY, ARWEN BAILEY, HARPINDER S. SANDHU y EPHRAIM NKONYA. “Biodiversity and ecosystem services”, en CLAYTON CAMPANHOLA y SHIVAJI PANDEY (eds.). *Sustainable food and agriculture: an integrated approach*, San Diego, FAO y Elsevier, 2019.



Editado por el Instituto Latinoamericano de Altos Estudios –ILAE–,
en julio de 2022

Se compuso en caracteres Minion Pro de 11 y 9 ptos.

Bogotá, Colombia