

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**



**TESIS**

**HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS ANDINOS DE LA REGIÓN PUNO  
COMERCIALIZADOS EN LA REGIÓN AREQUIPA**

**PRESENTADA POR:**

**JOSE LUIS VILCA TICONA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**PUNO, PERÚ**

**2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**



**TESIS**

**HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS ANDINOS DE LA REGIÓN PUNO  
COMERCIALIZADOS EN LA REGIÓN AREQUIPA**

**PRESENTADA POR:**

**JOSE LUIS VILCA TICONA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

**APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:**

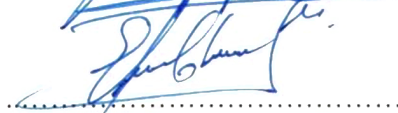
**PRESIDENTE**

.....  
Dr. LUIS ALFREDO PALAO ITURREGUI



**PRIMER MIEMBRO**

.....  
Dr. ERNESTO CALANCHO MAMANI



**SEGUNDO MIEMBRO**

.....  
Dr. GERMAN BELIZARIO QUIÑE



**ASESOR DE TESIS**

.....  
Dr. MARCELINO JORGE ARANIBAR ARANIBAR



Puno 4 de enero del 2019

**ÁREA:** Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Propuestas tecnológicas por sectores productivos.

**TEMA:** Cultivos andinos de la Región Puno.

## DEDICATORIA

A Dios, por darme salud e iluminarme sobre los conocimientos ambientales.

A mi padre Enrique Vilca Maquera, de que soy fruto de su esfuerzo y trabajo, que desde el cielo iluminará siempre mi camino.

A mi querida madre Eduarda Ticona Calli, por su amor y compañía en todo aspecto.

Para ti Leyla que fuiste y serás mi brazo derecho en todas las acciones que realizo.

A Kimberlye, Milagros y Luis Andy que son y serán mi motivación para mi superación personal.

Mis amigos y colegas por su apoyo incondicional y su compañía con mucho aprecio.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios que me dio la vida, la sabiduría y la bendición para realizar trabajos ambientales.

A mi alma mater la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, con mucha gratitud al Programa de Doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, en especial a toda su plana docente, por habernos formado e inculcado sabias enseñanzas para desarrollarme en un campo de tanta importancia como es el ambiente en que vivimos.

Mi reconocimiento a los miembros del jurado: Dr. Luis Alfredo Palao Iturregui, Dr. Ernesto Calancho Mamani y Dr. German Belizario Quispe, por sus aportes en esta investigación.

Mi gratitud al Dr. Marcelino Jorge Aranibar Aranibar por todo su apoyo en la presente investigación.

Mil gracias a mi colega y amigo Blgo. Miguel A. López Ruelas, por sus contribuciones.

**ÍNDICE GENERAL**

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
ÍNDICE GENERAL .....	iii
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	viii
ACRÓNIMOS .....	ix
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT.....	xi
INTRODUCCIÓN .....	1

**CAPÍTULO I****REVISIÓN DE LITERATURA**

1.1. Marco teórico .....	3
1.1.1. Huella hídrica.....	3
1.1.2. Agua verde, azul y gris .....	4
1.1.3. Agua virtual .....	5
1.1.4. Métodos de medición de la huella hídrica (HH).....	6
1.1.5. Uso consuntivo del agua .....	7
1.1.6. Balance hídrico de la cuenca del Titicaca.....	8
1.1.7. Evapotranspiración .....	9
1.1.8. Evapotranspiración potencial (ETP).....	9
1.1.9. Evapotranspiración actual o real (ETC).....	10
1.1.10. Factores que influyen en la evapotranspiración.....	11
1.1.11. Coeficiente del cultivo (Kc).....	11

1.1.12.	Ley de recursos hídricos N° 29338.....	12
1.1.13.	Cultivos andinos de la región Puno .....	13
1.2.	Antecedentes .....	20
1.2.1.	Huella hídrica.....	20
1.2.2.	Agua virtual .....	22

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1.	Definición del problema.....	24
2.2.	Planteamiento del problema.....	25
2.3.	Justificación.....	25
2.4.	Objetivos de la investigación .....	26
2.5.	Hipótesis de la investigación.....	27

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Lugar de estudio .....	28
3.2.	Población y tamaño de muestra.....	29
3.3.	Métodos.....	30
3.3.1.	Formulación de un modelo conceptual para la determinación de la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno. ....	30
3.3.2.	Método para determinar la huella hídrica .....	30
3.3.3.	Método para estimar el volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos. ....	32
3.3.4.	Método para estimar el valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.....	33
3.4.	Operacionalización de variables .....	33
3.5.	Recolección de datos.....	34

## CAPÍTULO IV

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno. ....	37
4.2. Huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno. ....	43
4.2.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia .....	43
4.2.2. Evapotranspiración del cultivo (ETc) y requerimiento de agua del cultivo (RAC) .....	46
4.2.3. Superficie de terreno (ST).....	48
4.2.4. Rendimiento del cultivo (RC) y contenido de agua virtual .....	48
4.3. Volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos. ....	50
4.4. Valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos. ....	53
CONCLUSIONES .....	57
RECOMENDACIONES.....	58
BIBLIOGRAFÍA .....	59
ANEXOS .....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

		<b>Pág.</b>
1.	Cultivos andinos considerados en el estudio.....	29
2.	Variables y su operacionalización para el estudio.....	34
3.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por diferentes métodos (mm/mes), Puno en promedio 2010-2018.....	44
4.	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) por cultivo (mm) y coeficiente de cultivo (kc), Puno en promedio 2010-2018.....	45
5.	Evapotranspiración del cultivo (ET <sub>c</sub> ) y requerimiento de agua del cultivo (RAC-Huella hídrica) para nueve cultivos andinos de la región Puno.....	46
6.	Rendimiento promedio de nueve cultivos andinos y agua virtual (V <sub>j</sub> ) en la región Puno.....	48
7.	Comercialización de cultivos de Puno comercializados en Arequipa y agua virtual transferida VAt).....	50
8.	Valor económico de agua virtual de cultivos andinos de Puno comercializados en Arequipa.....	54
9.	Variables de cálculo, notación y unidades utilizadas para determinar la huella hídrica de cultivos andinos.....	66
10.	Estadísticas agronómicas de cultivos andinos.....	67



## ÍNDICE DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
1.	Mapa de ubicación de la región Puno y flujo de agua virtual hacia Arequipa.....	29
2.	Diagrama inicial del modelo conceptual del cálculo de huella hídrica.....	30
3.	Climadiagrama promedio de la región Puno 2015 a 2017 (SENAMHI), estación meteorológica CP-Puno.....	35
4.	Climadiagrama promedio de la región Puno (30 años) (SENAMHI), estación meteorológica CP-Puno.....	35
5.	Diagrama de entidad y relación (DER) para determinar la huella hídrica de cultivos andinos.....	37
6.	Diagrama de entidad y relación con lista de atributos para determinar la huella hídrica de cultivos andinos.....	38
7.	Diagrama conceptual final para determinar la huella hídrica de cultivos andinos.....	40
8.	Relación entre consumo de agua (ETc) y huella hídrica (RAC) de los cultivos andinos de la región Puno.....	47
9.	Distribución porcentual de la huella hídrica de cultivos andinos de la región Puno comercializados en la ciudad Arequipa.....	51
10.	Relación entre huella hídrica (RAC) y volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos.....	52
11.	Relación entre huella hídrica (RAC) y valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.....	55
12.	Cálculo de evapotranspiración por cinco métodos.....	69

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
1. Variables de cálculo utilizadas en el estudio .....	66
2. Estadísticas descriptivas agronómicas de nueve cultivos andinos de la región Puno	67
3. Cálculos de evapotranspiración para la región Puno .....	69
4. Valores de temperatura y precipitación pluvial .....	70
5. Evidencias fotográficas .....	76
6. Cartas solicitando información a la DRA PUNO y AREQUIPA.....	79
7. Valores de temperatura y precipitación pluvial utilizados en climadiagramas .....	83
8. Características edáficas promedio de suelos de la región Puno.....	83
9. Procedimientos de cálculo en el software CROPWAT V. 8.0 .....	84

## ACRÓNIMOS

- FAO : Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- OMM : Organización Mundial Meteorológica
- ET<sub>o</sub> : Evapotranspiración de referencia
- K<sub>c</sub> : Coeficiente de cultivo
- ET<sub>c</sub> : Evapotranspiración del cultivo
- ST : Superficie de terreno
- RAC : Requerimientos de agua del cultivo
- RC : Rendimiento del cultivo
- V : Contenido en agua virtual
- E<sub>j</sub> : Comercializaciones del producto j
- V<sub>j</sub> : Contenido en agua virtual del producto j
- AV<sub>t</sub> : Agua virtual transferida en productos agrícolas

## RESUMEN

Alrededor del 70% del agua es utilizada en la agricultura, en la región Puno su actividad agrícola se realiza básicamente con el agua de precipitación pluvial (agua verde). En este estudio se propuso determinar la huella hídrica de los principales cultivos andinos de la región Puno comercializados en la región Arequipa, estimando el agua virtual movilizada en los mismos y su valoración económica. La metodología incluyó información del clima, plantas y suelo, calculando el consumo de agua por cultivo, mediante el software Cropwat versión 8.0 (1997) de la Organización para la Alimentación y Agricultura (FAO). Se formuló un modelo que permitió determinar la huella hídrica de cultivos andinos, que incorpora la evapotranspiración de referencia, coeficiente de cultivo, superficie de terreno, rendimiento de cultivo y volumen de comercialización. El cultivo de papa tuvo la mayor huella (6,660.69 m<sup>3</sup>/ha), el tarwi tuvo la menor huella (3,750.45 m<sup>3</sup>/ha). Los demás cultivos tuvieron valores intermedios como oca (5,449.75), olluco (4,762.52), haba (4,091.39), quinua (6,179.58), kañiwa (5,466.55), cebada (4,159.33) y mashua (5,387.82 m<sup>3</sup>/ha). El volumen de agua virtual estimado procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa, fue también mayor para la papa (145,175,163.13 m<sup>3</sup>/año) y menor para mashua (1,098,284.76 m<sup>3</sup>/año). El valor económico del agua virtual estimado procedente de la región Puno que ingresa hacia la ciudad de Arequipa, fue mayor para la papa (60,247,692.70 de soles/año) y menor para mashua (455,788.17 de soles/año). En general se traslada de Puno hacia la ciudad de Arequipa un valor de 90,764,178.56 de soles en agua virtual contenida en productos de cultivos andinos. Se concluye que, a partir de la determinación de la huella hídrica es posible demostrar que existe un tránsito importante de agua virtual de la región Puno hacia la ciudad de Arequipa contenida en los cultivos andinos comercializados.

**Palabras clave:** Agua verde, agua virtual, comercialización, cultivos, huella hídrica, valor económico.

## ABSTRACT

Around 70% of the water is used in agriculture, in the Puno region its agricultural activity is basically carried out with rainwater (green water). In this survey it was proposed to determine the water footprint of the main Andean crops of the Puno region commercialized in the Arequipa region, estimating the virtual water mobilized in them and their economic valuation. The methodology included information on climate, plants and soil, calculating water consumption by crop, using the Cropwat software version 8.0 (1997) of the Food and Agriculture Organization (FAO). A model was formulated that allowed determining the water footprint of Andean crops, which incorporates reference evapotranspiration, crop coefficient, land area, crop yield and commercialization volume. The potato crop had the largest footprint (6,660.69 m<sup>3</sup>/ha), the tarwi had the lowest footprint (3,750.45 m<sup>3</sup>/ha). The other crops had intermediate values such as oca (5,449.75 m<sup>3</sup>/ha), olluco (4,762.52 m<sup>3</sup>/ha), broad bean (4,091.39 m<sup>3</sup>/ha), quinoa (6,179.58 m<sup>3</sup>/ha), kañiwa (5,466.55 m<sup>3</sup>/ha), barley (4,159.33 m<sup>3</sup>/ha) and mashua (5,387.82 m<sup>3</sup>/ha). The economic value of estimated virtual water from the Puno region that get into the city of Arequipa, was higher for potatoes (60,247,692.70 soles/year) and lower for mashua (455,788.17 soles/year). Generally, a value of 90,764,178.56 soles in virtual water contained in products of Andean crops is transferred from Puno to the city of Arequipa. It is concluded that, from the determination of the water footprint it is possible to demonstrate that there is an important virtual water transit from the Puno region to the city of Arequipa contained in the commercialized Andean crops.

**Keywords:** Crops, economic value, green water, merchandising, virtual water, water footprint.

## INTRODUCCIÓN

El agua es considerada como un recurso esencial para la vida en nuestro planeta, mantenimiento del bienestar humano y para garantizar el correcto funcionamiento de los ecosistemas (Falkenmark, 2003), también es uno de los ejes fundamentales para alcanzar los objetivos perseguidos en una “economía verde” (UNEP, 2011). La mayor parte del agua en el mundo es actualmente consumida por la agricultura, tanto para la producción de alimentos, como para la producción de fibras vegetales, o la cada vez más frecuente producción de biocombustibles, de esta forma, alrededor del 70% del agua utilizada en el planeta es destinada a usos agrarios (De Santa Olalla, 2005).

La huella hídrica, que viene a ser el volumen de agua requerido a través de la cadena de suministro para elaborar un producto, es un aspecto de interés en todo país que busque la optimización de este recurso tan escaso. Sin embargo, una distinción fundamental entre huella hídrica y huella de carbono, radica en que el agua es un recurso local mientras que el carbono puede considerarse de nivel global. Por lo tanto, a diferencia de lo que ocurre con la huella de carbono, es necesario entender muchos más temas locales y de contexto para comprender lo que implica la huella hídrica, así como el agua virtual que se moviliza en ella (WWF-Perú, 2013).

En la actualidad se desconoce la cantidad de agua que es transferida mediante los cultivos andinos que se producen en la región Puno hacia Arequipa, cuyo conocimiento lo consideramos importante para tomarlo en cuenta en la gestión de los recursos hídricos en la zona sur del Perú, por lo que la presente investigación presenta interés, ya que permite conocer inicialmente la huella hídrica de los principales cultivos andinos de la región Puno, mediante la utilización de un modelo conceptual apropiado, posteriormente se realiza la estimación del agua virtual que se traslada en dichos productos, así como su cuantificación económica, resultados que finalmente permitirán una mejor gestión del agua en la región sur del Perú, específicamente contribuir en actualizar parte del balance hídrico agrícola de la vertiente de Titicaca, identificando cultivos de bajo consumo de agua y promoviendo el intercambio de otros productos de mayor consumo del mismo y en forma inversa de ser necesario.

El presente trabajo de investigación inicia con una introducción del tema de estudio, en el Capítulo I realizamos una revisión exhaustiva de la literatura relevante sobre el tema y los antecedentes del mismo; en el Capítulo II se muestra el planteamiento del problema,

de cuya percepción inicial inició el proceso investigativo; en el Capítulo III presentamos los materiales y métodos utilizados en el desarrollo del estudio, especificando el lugar de estudio, población, muestra, métodos y su descripción para cada objetivo específico de la investigación; en el Capítulo IV exponemos los resultados y discusión, presentándolos en tablas y figuras, realizando una descripción de los mismos y su respectivo análisis estadístico, posteriormente se realiza la discusión de los mismos en relación con la literatura revisada; finalmente se presenta las conclusiones derivadas de los resultados, las recomendaciones pertinentes y la bibliografía utilizada, en los anexos se encuentran información adicional y figuras de la evidencia de la realización del estudio.

## CAPÍTULO I

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 1.1. Marco teórico

##### 1.1.1. Huella hídrica

El concepto de huella hídrica fue introducido por primera vez por Arjen Hoekstra en el Instituto para Educación en Agua de la UNESCO en el año 2002, y fue luego desarrollado por la Universidad de Twente en los Países Bajos y por la Red de Huella Hídrica (WFN). Este concepto fue propuesto como un indicador alternativo a la medición de uso de agua. Como indicador, la huella hídrica es distinta a las estadísticas tradicionales de agua que sólo consideran el uso de agua de consumo y no la extracción de agua (Van Hofwegen, 2004).

La huella hídrica se introdujo también como un concepto análogo a la huella ecológica y a la huella de carbono, mientras que la huella de carbono es la cantidad de carbono emitido a lo largo de la cadena de suministro para producir un bien, la huella de agua es el volumen de agua requerido a través de la cadena de suministro para elaborar un producto. Sin embargo, una distinción fundamental entre huella hídrica y huella de carbono radica en que el agua es un recurso local mientras que el carbono puede considerarse de nivel global (WWF-Perú, 2015).

Hoekstra *et al.* (2009), indican que el uso del término de huella hídrica (HH) es mucho más amplio, al referirse no sólo al volumen “embebido” en un producto, sino que incluye la diferenciación entre el tipo de agua utilizada, así como el lugar y momento de producción. Además, el término HH puede ser aplicado tanto a productores como a consumidores, ya sean particulares o en un área geográfica delimitada. Es por ello, que la mayor parte de los trabajos se refieren de forma complementaria al término HH como el valor utilizado para medir la presión generada por una actividad sobre los recursos hídricos y agua virtual (AV)) para referirse a los flujos asociados al intercambio de mercancías o productos agrícolas.



### **Razones para calcular la huella hídrica**

El principal motivo para su cálculo es que se ha identificado que en muchos países y áreas geográficas se ha superado con creces la propia capacidad de aporte hídrico. Es decir, que se han detectado déficits a nivel de sostenibilidad en materia de la gestión del agua (balance hídrico).

Los datos calculados hasta el momento sobre huella hídrica indican que está distribuida de manera desigual a lo largo del planeta, al igual que los recursos hídricos. Los países desarrollados suelen tener una huella hídrica mayor que los países en vías de desarrollo. El motivo es que en los primeros es mayor el consumo de productos altamente demandantes de agua en sus procesos de producción que en los segundos (Velázquez, 2008).

Es evidente que el cálculo de la huella hídrica aporta información para conocer en qué puntos de nuestra producción podemos reducir el consumo de agua, de forma que apliquemos los principios del desarrollo sostenible. Adicionalmente, a través de este cálculo se puede llegar a relacionar el consumo diario de agua y los problemas de contaminación y distribución de agua en lugares donde se producen los bienes y, por tanto, cuantificar los efectos del consumo y comercio en el uso de los recursos hídricos (Velázquez, 2008).

### **Medidas para reducir la huella hídrica**

Entre las posibilidades para reducir la huella hídrica se encuentran las siguientes prácticas:

- Cambiar el modelo de consumo sustituyendo los productos con elevada huella hídrica por otros cuya huella hídrica sea menor.
- Seleccionar el producto con menor huella hídrica o que la huella del producto se dé en un área geográfica donde no haya escasez de agua.
- El reciclaje y la reutilización del agua puede ser una herramienta para la reducción de la huella hídrica gris de los usos del agua (Pengue, 2004).

#### **1.1.2. Agua verde, azul y gris**

En la huella hídrica se diferencia el agua verde, el agua azul y el agua gris; el agua verde ( $HH_{\text{verde}}$ ) se define como el agua procedente de la precipitación y que es evaporada de forma directa durante el proceso productivo, el uso de agua verde se

encuentra por lo general asociado a la agricultura o la silvicultura. Respecto a su fuente el agua verde se almacena en suelos no saturados y que puede ser absorbida por las raíces de las plantas, se la considera un agua altamente inmóvil, la sustitución de su fuente es imposible, mientras que su costo de uso es bajo (Chouchane *et al.*, 2014).

El agua azul ( $HH_{\text{azul}}$ ) se define como el volumen de agua, ya sea de origen superficial o subterráneo, que es consumida durante el proceso de producción y que necesita de una infraestructura más o menos compleja para su utilización, en el caso de la agricultura, el agua azul hace referencia al consumo de agua aplicada mediante diversos sistemas de riego (Rendón, 2015).

El agua gris ( $HH_{\text{gris}}$ ) hace referencia a la contaminación que un proceso productivo genera sobre los recursos hídricos locales, se define como el volumen total de agua necesario para asimilar la concentración de contaminantes vertidos al medio receptor, en función de la calidad intrínseca de dicho medio, y un límite ambiental máximo preestablecidos (Hoekstra *et al.*, 2009).

En el Perú, los departamentos con mayor consumo de agua son Lambayeque, Piura y La Libertad. De la huella hídrica total, el 7% corresponde a la huella hídrica gris, el 9% corresponde a la huella hídrica verde y el 84% corresponde a la huella hídrica azul. Por ejemplo en promedio, la huella hídrica total del arroz en el Perú es 6496,04 m<sup>3</sup>/ton, considerado un producto de alto consumo de agua (Rendón, 2015).

### 1.1.3. Agua virtual

El concepto de agua virtual (AV) fue inicialmente utilizado para evaluar los flujos de agua asociados a la importación de productos agroalimentarios a nivel internacional, como respuesta de algunos países a la escasez de agua en sus propios territorios (Allan, 2003), el término AV se encuentra por tanto muy relacionado con el comercio internacional, permitiendo estimar el “ahorro de agua” que se deriva de la importación de una determinada mercancía o producto en lugar de producirla en el propio país de consumo.

Algunos autores abogan por usar el término de AV desde el punto de vista del país consumidor y no del país productor, definiendo el concepto como el total de agua que se necesitaría para producir el bien consumido en el propio país consumidor y

no en el país productor. Esta evaluación permitiría justificar mejor aún el ahorro hipotético de agua derivado de la importación, al cuantificar el volumen de agua que dicho país importador necesitaría para producir las mercancías consumidas. Pero esta definición no ha cuajado entre la comunidad científica, pues requiere de la evaluación de un bien hipotético no producido realmente, lo que dificulta su medición mediante criterios empíricos (Van Hofwegen, 2004).

#### **1.1.4. Métodos de medición de la huella hídrica (HH)**

La metodología de hallar la huella hídrica (HH) se encuentra ampliamente desarrollada, gracias a los numerosos trabajos publicados desde la creación del concepto en el año 2003, con más de 250 artículos indexados en el año 2011, según el Journal Citation Index. Prueba de su importancia es la creación en el año 2008 de la “Water Footprint Network” (WFN), una red internacional compuesta por instituciones académicas e investigadoras, organismos públicos, organismos no gubernamentales, organizaciones internacionales y empresas privadas. Su objetivo principal es ahondar en el conocimiento de la HH como indicador que permita medir los impactos de las actividades humanas sobre los recursos hídricos. La WFN ha desarrollado un manual “The Water Footprint Assessment Manual” que recopila y estandariza los principales conceptos y avances metodológicos relacionados con la evaluación de la HH. Dicho manual es revisado y ampliado de forma continua, tratando de recopilar los cambios metodológicos que se producen en la materia.

Según el manual de la WFN (Hoekstra *et al.*, 2009), el proceso de evaluación de la HH se puede dividir en cuatro pasos fundamentales:

1. Definición del objetivo y alcance del análisis.
2. Contabilidad de la HH, seleccionando la metodología apropiada según el ámbito de aplicación elegido.
3. Análisis de la sostenibilidad social, ambiental y económica de la HH evaluada.
4. Formulación de respuestas que permitan minimizar los impactos detectados.

La mayor parte de los estudios realizados hasta el momento se han centrado exclusivamente en los dos primeros pasos de la evaluación de la HH, al ser estos los que tienen un mayor carácter descriptivo, siendo el tercero fundamental si se quiere realizar una interpretación de los posibles impactos, sin embargo los dos primeros pasos son los que se deben priorizar en la práctica investigativa, debido a

que los pasos posteriores no se llevarían a cabo sin dichas bases descriptivas (Rendon, 2015).

### **Tipos de huella hídrica**

- Huella hídrica de un producto: La huella hídrica de un producto es el volumen de agua dulce utilizada para producir el bien o servicio, medida en el lugar donde se produjo el bien. Se refiere a la suma del agua utilizada en las distintas etapas de la cadena de producción. También se conoce como contenido virtual de agua.
- Huella hídrica de una comunidad: La huella hídrica de una comunidad se define como el volumen de agua utilizado para la producción de los bienes y servicios que consumen los miembros de dicha comunidad.
- Huella hídrica de una nación: La huella hídrica de una nación es un indicador de los efectos del consumo nacional de agua, considerando los recursos internos y externos. El ratio de consumo interno/externo de agua es relevante ya que externalizar la huella hídrica implica incrementar la dependencia en recursos hídricos extranjeros. También resulta en externalizar los impactos ambientales que el consumo/uso de agua conlleva (Arabi, 2012).

#### **1.1.5. Uso consuntivo del agua**

El uso consuntivo puede definirse como la cantidad de agua que consumen las plantas para germinar, crecer y producir económicamente, y cuantitativamente es un concepto equivalente al de evapotranspiración. Los principales componentes del uso consuntivo del agua son la transpiración y la evaporación (Garay, 2011).

Los factores fundamentales que influyen en el uso consuntivo del agua son:

- Clima, representado por la temperatura, humedad relativa, vientos, latitud, luminosidad, precipitación, etc.
- Cultivo, representado por la especie vegetal, variedad, ciclo vegetativo, hábitos radiculares, etc.
- Suelo, representado por la textura, profundidad del nivel freático, capacidad de retención de humedad, etc.
- Agua de riego, en cuanto a su calidad, disponibilidad, prácticas de riego, nivel de la misma con respecto a la superficie, etc.

La cantidad de agua usada para la producción de un cultivo se suele denominar uso consuntivo, comprende el agua transpirada por las hojas de las plantas y la evaporada del suelo húmedo. Parte de las necesidades del uso consuntivo puede satisfacerse con la lluvia caída durante la época vegetativa o las precipitaciones anteriores a la siembra que quedan retenidas en el suelo y pueden ser utilizadas posteriormente por la planta (Garay, 2011).

#### **1.1.6. Balance hídrico de la cuenca del Titicaca**

Se conoce que el conjunto de la cuenca del Titicaca recibe una precipitación de 758 mm año<sup>-1</sup>, o sea un volumen de  $43,6 \times 10^9$  m<sup>3</sup>. La lluvia media interanual sobre la totalidad del lago es de 880 mm año<sup>-1</sup>; o sea un volumen de agua de  $7,47 \times 10^9$  m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, equivaliendo a un caudal de 236,7 m<sup>3</sup> S<sup>-1</sup>. El Lago Mayor recibe interanualmente 889 mm año<sup>-1</sup> de lluvia y el Lago Menor, con menores precipitaciones, 829 mm año<sup>-1</sup>. Traducidas en volumen, estos valores ( $6,42 \times 10^9$  y  $1,05 \times 10^9$  m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>) corresponden a 86% y 14% de la alimentación pluvial del conjunto del lago. La parte peruana recibe 786 mm año<sup>-1</sup>, de los cuales 762 mm año<sup>-1</sup> sobre las cuencas y 964 mm año<sup>-1</sup> sobre el lago peruano, en volumen es de  $34,5 \times 10^9$ ,  $29,4 \times 10^9$ ,  $4,94 \times 10^9$  m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> para el Perú. Las cinco cuencas peruanas para las cuales se observaron los caudales, reciben juntas una precipitación media interanual de 769 mm año<sup>-1</sup>, mientras que el resto de la cuenca recibe 682 mm año<sup>-1</sup> (Roche *et al.* 1991)

La revisión de diversos estudios sobre el balance de la cuenca del Titicaca indican que el caudal medio anual que se podría aprovechar en todo el sistema sin poner en riesgo su sostenibilidad se estimó en 20m<sup>3</sup>/s repartidos en partes iguales entre Perú y Bolivia (Molina, 2014), de lo cual se evidencia la fragilidad de este sistema hídrico.

Haciendo el balance hídrico en la cuenca del Titicaca, se conoce que las aguas del lago Titicaca han disminuido más de dos metros de su nivel normal, por las siguientes causas: en evaporación pierden 1200 mm/año y tiende a incrementarse, otro de los factores por lo que disminuyen las aguas del Titicaca es la desglaciación de las cordilleras oriental y occidental, que se da aceleradamente como un proceso continuo (Serruto, 1992).

### **1.1.7. Evapotranspiración**

La evapotranspiración es la pérdida total de agua de una cobertura vegetal, bajo forma de vapor a través de la evapotranspiración durante un intervalo de tiempo dado. La evaporación y la transpiración son procesos físicos muy similares, mediante los cuales, el agua pasa del estado líquido al de vapor que es la forma en que escapa a la atmósfera, diferenciándose entre ellos únicamente en el tipo de la superficie evaporante. También, indica que la transpiración aumenta a medida que crece y se desarrolla la cubierta vegetal y en consecuencia aumenta el índice y el grado de la cobertura de la superficie por aquella, de tal manera que cuando la cobertura es total, la transpiración es la fuente más principal de la pérdida de agua, pudiendo estar entre el 90 a 95 % la evapotranspiración (ET) (De Santa Olalla, 2005).

Así mismo se conoce que el concepto de evapotranspiración involucra los fenómenos de transpiración de las plantas y la evaporación del suelo. Lo anterior, más el agua utilizada para la formación de los tejidos de las plantas, se le llama en las ciencias agronómica como el uso consuntivo. En general, el agua en las plantas que han sido utilizados está entre 2 a 5% (Serruto, 2003).

### **1.1.8. Evapotranspiración potencial (ETP)**

Se entiende por evapotranspiración la cantidad de agua evaporada y transpirada por una cobertura de pequeñas plantas en estado activo de crecimiento y con suministro continuo y adecuado de humedad, para la estimación se consideran los factores climáticos dentro de los cuales, los más importantes son: La radiación incidente, temperatura ambiental y humedad relativa como lo señala Hargreaves (1975).

Los factores de cultivo se utilizan para calcular la evapotranspiración real (ETC) de la evapotranspiración potencial (ETP) y son influenciadas por la etapa de crecimiento, porcentaje de cobertura de la planta y total de la superficie foliar.

La ETP se puede definir en términos de cultivo como la pérdida de agua de extensos campos de cultivos en su estado de crecimiento y desarrollo intenso, con un suelo sin déficit de agua, o sea teniendo el suelo un potencial matricial próximo a - 0.06 Atm. (- 62 cm de columna anual) (García, 1992).

Existen varios métodos para determinar la evapotranspiración potencial. Los más comunes son los siguientes:

- Por muestreo por humedad del suelo.
- Lisímetro
- Tanque de evaporación.
- Balance de agua.
- Métodos o fórmulas empíricas (Hargreaves, Penman, Blaney – Criddle, Jensen – Haise).

### 1.1.9. Evapotranspiración actual o real (ETC)

Hargreaves (1975), manifiesta que la evapotranspiración real, es el uso potencial del agua bajo condiciones favorables y es equivalente a ET (cultivo), por los cultivos agrícolas, incluyendo la evaporación directa de la humedad del suelo y de las plantas húmedas por las hojas.

García (1992), menciona que la evapotranspiración actual o real ocurre desde superficies húmedas con vegetación, considerando la evaporación desde suelos húmedos y la transpiración a través de las plantas. El conocimiento de este parámetro es muy importante para la planta conocido como índice de rendimiento vegetativo como lo indica Monsalve (1999), que es un conjunto de fenómenos de evaporación y de transpiración siendo la pérdida de agua observada en una superficie líquida o sólida saturada, en las condiciones reinantes atmosféricas.

Vásquez y Chang (1992), indican que es la tasa de evaporación y transpiración de un cultivo exento de enfermedades, que crece en un campo extenso (uno o más hectáreas) en condiciones óptimas de suelo, fertilidad y suministro de agua.

La evapotranspiración actual es llamada también uso consuntivo. Se calcula de la siguiente manera:

$$ETc = Kc \times ETP$$

Dónde:

ETc: Evapotranspiración real o actual del cultivo (mm ó cm)

Kc: Coeficiente que tiene en cuenta el efecto de relación agua planta

ETP: Evapotranspiración potencial (mm ó cm).

#### 1.1.10. Factores que influyen en la evapotranspiración

De Santa Olalla (2005), sustenta que después de una lluvia o de un riego, la interface entre el sistema terreno-planta y la atmósfera está saturada, y evidentemente la transpiración y la evaporación están en el valor potencial, siendo función de muchos factores reunidos en la siguiente expresión:

$$ET = f(c, s, v, f, g) Q \text{ no limitante}$$

Dónde:

c: Factores climatológicos (radiación, temperatura, y humedad del aire, velocidad del viento, etc.)

s: Factores edáficos (conductividad hídrica, espesor del estrato activo, calor superficial, capacidad hídrica, rugosidad de la superficie, etc.)

v: Factores de la planta (conductividad hídrica de los tejidos, estructura de la parte epigea, profundidad y densidad del sistema radical.)

f: Factores fitotécnicos (laboreo del suelo, rotación de cultivos, orientación de las líneas de siembra, densidad poblacional, tipo e intensidad de la poda, etc.)

g: Factores geográficos (extensión del área, variación de las características climáticas en el borde del área considerada, etc.)

Q: Agua disponible en la interface con la atmósfera, cuyo origen es la lluvia, el riego y/o aporte hídrico de la capa freática.

#### 1.1.11. Coeficiente del cultivo (Kc)

García (1992), señala que este es un parámetro que permite estimar la evapotranspiración real máxima de un cultivo en función de la evapotranspiración potencial o de referencia, es decir, el Kc. permite conocer las demandas hídricas de un cultivo en ausencia de lisímetros.

Vásquez y Chang (1992), mencionan que el coeficiente de cultivo es un factor que indica el grado de desarrollo o cobertura del suelo por el cultivo del cual se requiere evaluar su consumo de agua. Los factores que afectan los valores de Kc., son principalmente las características del cultivo, fecha de siembra, ritmo de desarrollo



del cultivo, duración del periodo vegetativo, condiciones climáticas y la frecuencia de lluvia o riego, especialmente durante la primera fase de crecimiento.

La metodología propuesta por la FAO en su publicación N° 56, indica que el coeficiente de Kc. de cada cultivo, tendrá una variación estacional en función de las fases de desarrollo del cultivo, y que son las siguientes:

- a. Fase inicial: Fase 1°.- Comprende el periodo de germinación y crecimiento inicial, cuando la superficie del suelo está cubierta o nada por el cultivo, desde la siembra al 10% de la cobertura vegetal.
- b. Fase de desarrollo del cultivo: Fase 2°.- Comprende desde el final de la fase inicial hasta que se llegue a una cobertura sombreada efectiva completa del orden del 70 a 80%.
- c. Fase media del periodo (maduración): Fase 3°.- Comprende desde que se obtiene la cobertura efectiva completa hasta el momento de iniciarse la maduración que se hace evidente por la decoloración o caída de hojas.
- d. Fase final del periodo vegetativo (cosecha): Fase 4°.- Comprende desde la final de la fase anterior hasta que se llega a la plena maduración o cosecha.

Gurovich (1999), define como un coeficiente de cultivo la relación entre la evaporación de un cultivo específico y la evaporación potencial del cultivo de un periodo de crecimiento de una etapa “fenológica” que es una evolución de una curva sigmoideal hasta llegar a un valor máximo.

#### **1.1.12. Ley de recursos hídricos N° 29338**

Esta ley regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Comprende el agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a esta. Se extiende al agua marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable. Tiene como finalidad regular el uso y gestión integrada del agua, la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, así como en los bienes asociados a esta. Sus principios son:

1. Principio de valoración del agua y de gestión integrada del agua El agua tiene valor sociocultural, valor económico y valor ambiental, por lo que su uso debe basarse en la gestión integrada y en el equilibrio entre estos. El agua es parte integrante de los ecosistemas y renovable a través del ciclo hidrológico.

2. Principio de prioridad en el acceso al agua El acceso al agua para la satisfacción de las necesidades primarias de la persona humana es prioritario por ser un derecho fundamental sobre cualquier uso, inclusive en épocas de escasez.

3. Principio de participación de la población y cultura del agua. El Estado crea mecanismos para la participación de los usuarios y de la población organizada en la toma de decisiones que afectan el agua en cuanto a calidad, cantidad, oportunidad u otro atributo del recurso. Fomenta el fortalecimiento institucional y el desarrollo técnico de las organizaciones de usuarios de agua. Promueve programas de educación, difusión y sensibilización, mediante las autoridades del sistema educativo y la sociedad civil, sobre la importancia del agua para la humanidad y los sistemas ecológicos, generando conciencia y actitudes que propicien su buen uso y valoración.

6. Principio de sostenibilidad. El Estado promueve y controla el aprovechamiento y conservación sostenible de los recursos hídricos previniendo la afectación de su calidad ambiental y de las condiciones naturales de su entorno, como parte del ecosistema donde se encuentran. El uso y gestión sostenible del agua implica la integración equilibrada de los aspectos socioculturales, ambientales y económicos en el desarrollo nacional, así como la satisfacción de las necesidades de las actuales y futuras generaciones.

10. Principio de gestión integrada participativa por cuenca hidrográfica. El uso del agua debe ser óptimo y equitativo, basado en su valor social, económico y ambiental, y su gestión debe ser integrada por cuenca hidrográfica y con participación activa de la población organizada. El agua constituye parte de los ecosistemas y es renovable a través de los procesos del ciclo hidrológico.

### **1.1.13. Cultivos andinos de la región Puno**

#### **1.1.13.1. La papa**

La papa (*Solanum andigenum*): es uno de los cultivos más importantes de la región andina, constituyendo una de las fuentes vegetales más nutritivas, debido a que su contenido en carbohidratos y proteínas es mucho más alto que el que se encuentra en los cereales, raíces y otros tubérculos. Es un cultivo muy sensible al déficit hídrico sobre todo en la época de tuberización, se

requiere por lo menos una precipitación de 600 mm de precipitación pluvial (Cárdenas, 1969).

Un estudio en la región Puno, señala que la evapotranspiración obtenida para el cultivo de papa fue de 610.76 mm de lámina hídrica (6107.6 m<sup>3</sup>/ha), teniendo en cuenta que la fase fenológica de mayor consumo de agua es al final de la floración con 157.73 mm de lámina de agua, seguido con el inicio de tuberización con 90.45 mm de lámina de agua, observando de esta forma, que en estas fases el cultivo presenta un mayor requerimiento hídrico, debido a que el cultivo se encuentra en pleno desarrollo y la planta cuenta con mayor cantidad de follaje, es por ello que los procesos de evaporación y transpiración son mayores; mientras que, la fase con menor consumo de agua es en la madurez fisiológica con 47,14 mm de lámina hídrica, puesto que en esta fase las hojas empiezan a marchitarse. Observándose de esta manera, que las etapas en que el cultivo requiere mayor cantidad de agua, es desde el inicio de la tuberización hasta el final de la tuberización; donde las plantas alcanzaron mayor crecimiento de altura, desarrollándose en esta etapa una mayor actividad fisiológica de las plantas. Los coeficientes de cultivo Kc presentaron variaciones a lo largo del periodo vegetativo, siendo el promedio del mismo de 1.17 (Canllahui, 2013).

#### **1.1.13.2. La oca**

Oca (*Oxalis tuberosa*): la oca después de la papa es el tubérculo más cultivado en los andes, es una planta baja de 30 a 40 cm de alto, tallos erectos y carnosos, las hojas tienen tres folíolos, verdes en la parte superior, con coloración morada en la inferior. Las flores nacen en las axilas superiores de las hojas y sobresalen de la planta. La parte comestible son los tubérculos cuya forma varía mucho, desde casi esféricos hasta cilíndricos y miden de 3 a 20 cm de largo, el aspecto externo se caracteriza por nudos o yemas en forma de escamas, con coloración muy variada. Se cultiva hasta los 4000 msnm en rotación con la papa y se producen de 5 a 9 ton/ha, el periodo vegetativo es de 6 a 7 meses en la región de Puno (León, 1964).

La oca es resistente a bajas temperaturas y prospera en climas fríos moderados, las heladas destruyen su follaje. Temperaturas por encima de los

28° C destruyen la planta. La oca, como la mayor parte de los tubérculos andinos requiere de períodos diurnos menores de 12 horas para iniciar la formación del tubérculo. En la mayoría de los casos los días más largos producen solamente el desarrollo del follaje (Tapia, 1990).

En los Andes, el cultivo de la oca crece en lugares donde las lluvias varían de 570 a 2150 mm. distribuidas uniformemente a través de las etapas de crecimiento. La siembra de la oca, se hace entre fines de septiembre y a principios de noviembre para aprovechar la humedad de la estación invernal (Suquilanda, 2014).

### **1.1.13.3. Olluco (*Ullucus tuberosis*)**

Es una planta compacta, con 20 a 30 cm de altura, los tallos son aristados, carnosos, verdes o con manchas moradas, las hojas son acorazonadas y carnosas y pueden ser comestibles; las flores son amarillas en forma de estrella, nacen en racimo dentro del follaje, el olluco rara vez produce semillas. Los tubérculos comestibles varían de esféricos a cilíndricos con yemas poco profundidad, de donde se deriva el nombre común de papas lisas, la coloración es variada verdes, amarillos con manchas purpúreas. El rendimiento es variable entre 4 a 5 ton/ha (Benavides *et al.*, 1966).

El cultivo del olluco, prospera mejor en suelos de textura liviana, con pH ligeramente ácido, con alto contenido de materia orgánica. Se ha observado que en suelos pesados (arcillosos) la tuberización se ve inhibida y no hay un buen engrosamiento de los tubérculos. El olluco, se encuentra en una faja de cultivo entre los 2.600 y 3.800 metros sobre el nivel del mar, aunque su área de cultivo óptimo está entre los 3.000 y 3.600 m de altitud (Suquilanda, 2014).

El cultivo del olluco, se desarrolla bien con temperaturas que oscilan entre los 8 y 14 grados centígrados y precipitación anual de 600 a 1.000 mm; otros autores reportan requerimientos de agua de entre los 800 y 1.400 mm, pero, fuera de estos límites se ve afectado el crecimiento y la tuberización.

Posiblemente, debido a su particular hábito de crecimiento; plantas pequeñas y compactas, es una especie tolerante a las heladas. En trabajos realizados por el Programa de Cultivos Andinos se encontró que algunos clones fueron

afectados por heladas hasta en tres ocasiones sucesivas de las que se recuperaron, presentando una buena capacidad de rebrote en cada ocasión y finalmente dieron cosechas aceptables. Lo que constituye una ventaja frente a las otras plantas andinas productoras de tubérculos, especialmente la papa que es susceptible a la helada (Tapia, 2007).

#### **1.1.13.4. Habas (*Vicia faba*)**

Si bien es un cultivo traído de Europa, se ha adaptado a la zona andina, es cultivado hasta los 3900 msnm y resiste temperaturas de hasta  $-4^{\circ}\text{C}$ , el haba tiene porte recto y erguido, con tallos fuertes y angulosos de hasta 1,6 metros de altura. Muestra hojas alternas, paripinnadas y compuestas, con folíolos anchos de forma oval-redondeada, color verde oscuro, sin zarcillos; el folíolo terminal no existe o se convierte en un zarcillo rudimentario, su contenido de proteína es de 18 a 26% cuando el grano está seco. Requiere bastante humedad y unos 700 mm de precipitación pluvial (Vasquez, 1968).

El haba tiene como centros de origen a Europa, Asia Central y Abisinia. Hay quienes sostienen que el haba fue cultivada desde la “edad de piedra”, siendo muy estimada por los egipcios y los romanos, fue traída por los españoles en la época de la conquista, sin embargo se ha adaptado tanto en las regiones andinas, que hoy se la considera como un cultivo andino más (Suquilanda, 2014).

El haba por ser un cultivo muy rústico y resistente a las bajas temperaturas, es ideal para nuestros páramos andinos, pues se ha observado que es capaz de soportar temperaturas de entre  $1$  a  $8^{\circ}\text{C}$  durante una hora, sin disminuir su producción y calidad. Para una buena producción de habas, se requiere una humedad que fluctúe entre los 800 a 1 500 mm, durante todo el ciclo de cultivo, que por lo general son las condiciones en el altiplano (Tapia *et al.*, 2007).

#### **1.1.13.5. Tarwi (*Lupinus mutabilis*)**

La planta mide hasta 1.5 m de altura, es poco ramificado, con hojas palmeadas compuestas por 5 a 7 folíolos, el pétalo más grande o estandarte de color azul oscuro, tiene una mancha amarilla en la base, los otros pétalos son azules o

blancos y las flores se tornan de color más claro al madurar. Las vainas son de 6 a 10 cm de largo por 2 cm de ancho, que contienen de 4 a 6 semillas elipsoides o lenticulares. Contiene cocinado entre 20 a 40% de proteína, su rendimiento está alrededor de 1 ton/ha (Cárdenas, 1969).

Cuando existe una apropiada humedad, el chocho se desarrolla mejor en suelos francos a francos arenosos, con un pH de 5.5 a 7.00, requiere además un balance adecuado de nutrientes. No necesita elevados niveles de nitrógeno, pero sí la presencia de fósforo y potasio. Lo que no resiste el chocho son los suelos pesados y donde se puede acumular humedad en exceso (Suquilanda, 2014).

El tarwi, se cultiva en áreas moderadamente frías (7° -14° C).. Durante la formación de granos, después de la primera y segunda floración, el chocho es tolerante a las heladas. Al inicio de la ramificación es algo tolerante, pero susceptible durante la fase de formación del eje floral. Los requerimientos de humedad son variables dependiendo de las variedades que se cultiven; sin embargo, y debido a que el chocho se cultiva sobre todo bajo secano, oscilan entre 300 a 600 mm. La planta es susceptible a sequías durante la formación de flores y frutos, afectando seriamente la producción (Tapia, 1990).

#### **1.1.13.6. Quinoa (*Chenopodium quinoa*)**

La planta es alta con el eje central poco ramificado, la raíz es pivotante, cónica, llega hasta unos 15 cm de profundidad y tiene numerosas radículas laterales. El tallo es cilíndrico en la parte inferior, aristado hacia arriba, especialmente en la inserción de las hojas. Las flores son sésiles o tienen pedicelos cortos, las flores están agrupadas en glomérulos. La semilla mide de 1 a 1.5 cm de diámetro, es lenticular o elipsoidal. El rendimiento de grano es alrededor de 500 kg/ha (Tapia, 1990).

La quinua produce bien en áreas cuya temperatura oscila entre 9° a 16° C, pudiendo soportar heladas de – 5° C. La presencia de veranillos prolongados, con altas temperaturas diurnas fuerza a la formación de la panoja y su maduración, lo que se traduce en bajos rendimientos.

Precipitaciones anuales de 600 a 2 600 mm son las más apropiadas para el cultivo de la quinua. La mínima precipitación para obtener un buen rendimiento es de 400 mm (4 000 metros cúbicos distribuidos durante el ciclo de cultivo), observándose que es un cultivo capaz de soportar la sequía pero no en exceso. En alturas mayores a los 3 000 metros sobre el nivel del mar, la concentración de las lluvias afecta a este cultivo (Suquilanda, 2005).

La quinua es un cultivo que no soporta excesos de agua, por lo que es importante trazar zanjas al interior y en el contorno del campo de cultivo, para drenar el campo en caso de que se produzcan lluvias copiosas (Tapia *et al*, 2007).

#### **1.1.13.7. Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*)**

Planta herbácea, ramificada desde la base, altura de 50 a 60 cm, período vegetativo entre 140 y 150 días. El color de la planta (tallos y hojas) cambia según el ecotipo en la fase fenológica de grano pastoso; de verde a: anaranjado, amarillo claro, rosado claro, rosado oscuro, rojo y púrpura. En el Perú, la mayor concentración de producción de kañiwa se encuentra en el altiplano de la región Puno, principalmente en las provincias de Melgar (Distritos: Llalli, Macarí, Ayaviri, Nuñoa), Azángaro, Huancané, San Román, Puno (Distrito: Acora) y Chuchito (Distritos: Pomata y Kelluyo), es una especie andina que durante cientos de años ha sido de gran relevancia para la alimentación de los pobladores andinos (Apaza, 2010).

El Altiplano de la Región Puno, donde se cultiva la kañiwa, se ubica a altitudes mayores a los 3800 msnm., las zonas más bajas del altiplano se encuentran alrededor del lago Titicaca. La temperatura media máxima varía entre 13 y 19°C y la temperatura media mínima entre -10 y 5°C dependiendo del lugar y la época del año; las temperaturas medias mínimas más bajas ocurren durante los meses de invierno junio y julio; la temperatura media anual varía de 6 a 9°C dependiendo en la altitud y proximidad al lago Titicaca. La precipitación anual media varía de 580 a 745 mm, humedad relativa promedio mensual 55%, fotoperíodo de 9 a 10 horas sol por día (Grace, 1985).

En la planta de kañiwa existen mecanismos de adaptación, como hojas que cubren y protegen los primordios y ejes florales de las bajas temperaturas y

la presencia de pubescencia de vesículas en hojas y tallos, con cristales de oxalato de calcio higroscópicos que controlan la excesiva transpiración de la planta en sus diferentes fases fenológicas (Tapia *et al.*, 2007).

#### **1.1.13.8. Cebada (*Hordeum vulgare*)**

Cultivo introducido por los españoles en el periodo de la conquista. La cebada tiene dos tipos de sistemas de raíces, seminales y adventicias. La profundidad del alcance de las raíces depende de la condición, textura y estructura del suelo, así como de la temperatura (Box, 2008).

El tallo de la cebada tiene una estructura típica de las gramíneas y contiene una corona principal, misma que tiene el potencial de producir macollos secundarios. El número y longitud de macollos por planta está influenciado por la densidad de siembra, el genotipo y los factores ambientales. Es un fruto seco, indehisciente denominado cariósipide (Rasmusson, 1985), en la cebada de seis hileras, todas las espiguillas de un triplete son fértiles y capaces de desarrollar granos. Las semillas laterales tienden a ser ligeramente asimétricas y, en algunas variedades (formas intermedias) son más pequeñas que el grano central (Espinoza, 1988).

#### **1.1.13.9. Mashua (*Tropaeolum tuberosum*)**

Su cultivo se concentra desde los 1500 a 4200 msnm, su distribución geográfica va desde Colombia hasta Bolivia, soporta bien el frío. La planta es inicialmente erecta, en la madurez es semiprostrada, la forma de la hoja es ovalada, la cara superior es verde mate y la inferior verde claro, con tres, cuatro o cinco lóbulos. Los tubérculos pueden ser de color uniforme generalmente blanco, amarillo o anaranjado, presentan pigmentos de antocianina solo en las yemas. Se desarrolla bien en suelos con buen contenido de materia orgánica, se puede obtener rendimientos entre 10 a 15 ton/ha (INIAP, 2012).

El área adecuada para el cultivo de la mashua, es la misma que se requiere para el cultivo de la papa, es decir con una temperatura media anual que fluctúe entre los 6° y 14° Celsius, con una precipitación lluviosa de alrededor de 700 a 1200 milímetros anuales, es decir 7 000 a 12 000 metros cúbicos de



agua por ciclo Para evitar excesos de agua en el campo de cultivo, cuando las precipitaciones pluviales son excesivas, será importante realizar drenajes o caminos de agua para evitar que el exceso de humedad dañe al cultivo y a los tubérculos. Los drenajes deben circundar las parcelas de cultivo y en los suelos con pendientes deben realizarse siguiendo las curvas de nivel (Suquilanda, 2014).

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Huella hídrica

Arévalo *et al.* (2011), señalan que la huella hídrica de cualquier bien o servicio, es el volumen de agua utilizada directa o indirectamente para su producción, sumados los consumos de todas las etapas de la cadena productiva.

CNIC (2012), indica que el valor final de la huella hídrica se calcula de diversas maneras dependiendo de la metodología que se emplee, puede ser la suma de los tres tipos de agua (azul, verde y gris), o la suma de la huella hídrica directa e indirecta, las unidades utilizadas pueden ser  $m^3/kg$  o  $m^3/año$ ; señala también que la huella hídrica se puede reducir cambiando el modelo de consumo por productos con menor huella hídrica, seleccionando productos de áreas geográficas donde no haya escasez de agua y reciclando y reutilizando el agua, es decir una planificación de gestión del agua y de los tipos de cultivo en base a la disponibilidad del recurso hídrico, para una posterior comercialización local, regional y aún mundial.

Chapagain *et al.* (2006), señalan que se puede ahorrar agua mediante la importación de productos agrícolas de alto consumo de agua y exportando productos con menor consumo de este elemento, en su evaluación muestra que si todos los productos agrícolas importados se producirían en dicho país se emplearía  $1605 Gm^3/año$ , estos productos sin embargo se están produciendo con solo  $1253 Gm^3/año$  en los países exportadores, el ahorro de los recursos mundiales de agua es de  $352 Gm^3/año$ , lo cual demuestra que la planificación tiene efecto positivo en el ahorro del agua.

En Túnez Chouchane *et al.* (2014), manifiestan que analizaron la huella hídrica de 1996 al 2005, identificando que la papa y el tomate presentan alta productividad del agua, mientras que las aceitunas y la cebada con baja productividad, la huella hídrica azul de la producción agrícola de este país representa el 31% de los recursos hídricos renovables, indicando que en Túnez existe escasez significativa de agua;

concluye que la huella hídrica promedio global para cebada fue 1420 m<sup>3</sup>/ton, trigo con 1830 m<sup>3</sup>/ton, zanahoria con 200 y la papa con 290 m<sup>3</sup>/ton.

Mekonnen *et al.* (2011), señalan que ha medido el consumo de agua mediante el modelo CROPWAT de la FAO, así como estimando la huella hídrica de más de 200 productos agrícolas; la huella hídrica promedio global por tonelada de cosecha fue para el azúcar 200 m<sup>3</sup>/ton, verduras 300, raíces y tubérculos 400, frutas 1000, cereales 1600, cultivos oleaginosos 2400 m<sup>3</sup>/ton; concluye que la huella hídrica varía por categoría de cultivo y por región de producción, por lo que una planificación de intercambio de productos, puede optimizar el uso del agua.

Chapagain y Hoekstra (2004), estiman que el valor de la huella hidrológica total de la humanidad es de 7500 km<sup>3</sup>/año, cuyo aumento se debe principalmente al uso de agua para fines domésticos y urbanos y elaboración de productos industriales; sin embargo señalan que el agua precipitada en la tierra es del orden de 115000 km<sup>3</sup>, es decir desde un punto de vista global las necesidades de agua azul y verde de la humanidad quedan por debajo del 10% de las precipitaciones anuales, sin embargo el uso inadecuado permite la escasez del mismo en muchas regiones del mundo.

Arabi, *et al* (2012), En este estudio, estimaron la huella hídrica agrícola y sus componentes desde la perspectiva del consumo en regiones áridas y semiáridas como Irán, indican que Irán importó agua virtual neta de 11.640 millones de metros cúbicos como comercio internacional de cultivos en 2005-2006. Por lo tanto ha dependido de las importaciones virtuales de agua. Al conservar alrededor del 60% de la eficiencia de la irrigación, el requerimiento total de agua para producir cultivos importados en Irán es de casi 20.78 mil millones de metros cúbicos. Es casi el 9% de los recursos hídricos renovables y el 12,65% del agua agrícola apropiada que se ha agregado a los recursos hídricos internos. El presupuesto de agua virtual agrícola es de aproximadamente 112.78 Gm<sup>3</sup>/año. La huella de agua agrícola es de 110.2 Gm<sup>3</sup>/año. Alrededor del 12.83% de la huella hídrica agrícola de Irán está relacionada con recursos hídricos externos en los límites del país. Los índices de dependencia del agua, autosuficiencia hídrica y escasez de agua en el sector agrícola de Irán se estiman en 10.1%, 89.9% y 70.8%, respectivamente.

González (2016), estimó la huella hídrica de los cultivos de papa y pastos para el periodo 2009 – 2014 para los dos grupos de agroecosistemas analizados. Se

complementó con el análisis cualitativo de los aspectos culturales que determinan el consumo de agua en los cultivos. Los agricultores arrendatarios sólo siembran papa y su principal objetivo es lograr que el cultivo sea rentable. Obtienen dos cosechas de papa al año y el valor promedio estimado de huella hídrica para este cultivo es de 430,2 m<sup>3</sup>/t. El valor estimado de huella hídrica para los cultivos manejados por arrendatarios es superior con respecto a los propietarios, quienes destinan parte de la cosecha para el autoconsumo y se preocupan por la protección del suelo y el agua en el territorio. Los propietarios obtienen una cosecha de papa al año y el valor promedio estimado de huella hídrica por ciclo de cultivo de papa es de 422,2 m<sup>3</sup>/t. Para el cultivo de pasto se estimó un valor 103,3 m<sup>3</sup> /t por ciclo.

### 1.2.2. Agua virtual

Pengue (2004), manifiesta que el valor del agua virtual de un producto alimenticio es el inverso de la productividad del agua, podría entenderse como cantidad de agua por unidad de alimento que podría ser consumido durante su proceso de producción (FAO, 2003), es decir utilizada o contenida en la creación de los productos agrícolas. Así mismo indica que la circulación de agua virtual ha aumentado con las exportaciones de los países agrícolas durante 40 años, se estima que el 15% del agua utilizada en el mundo se destina a la exportación en forma de agua virtual (Hoekstra y Hung, 2002). El 67% de circulación de agua virtual está relacionada con el comercio internacional de diversos cultivos.

Llamas (2005), menciona que la suma de toda el agua virtual que necesita un país o región para atender la necesidad de bienes y servicios de sus habitantes, es lo que se denomina huella hidrológica, concluye que el estudio de esta huella está permitiendo obtener una visión bastante más optimista de la tan frecuentemente difundida inminente crisis del agua, los datos disponibles confirman que esta voceada crisis no es una crisis debida a la escasez física de este recurso, sino que esencialmente se trata de un problema de mala gestión y por lo tanto es posible revertirla en un mediano a largo plazo con políticas adecuadas.

Van Hofwegen (2004), estima que la liberalización del comercio de alimentos (y por ello del agua virtual), podría tener efectos negativos en el medio ambiente, sobre todo en los países que utilizan de modo exagerado o insostenible sus recursos hídricos para producir productos agrícolas de exportación; esto no es una hipótesis

absurda puesto que parece ser lo que está ocurriendo en Estados Unidos de Norteamérica, concretamente en el acuífero de Ogallala con extensión de 500 000 km<sup>2</sup> que es intensamente aprovechado durante 60 años, donde se ha extraído unos 6000 Km<sup>3</sup>, lo que es 10 veces la recarga interanual, conteniendo solo actualmente dos tercios del volumen inicial, poniendo en grave riesgo la sostenibilidad de este acuífero, claro ejemplo de que una gestión inadecuada de este recurso puede llevar a problemas ambientales.

Gilmont, *et al* (2016), señalan que el desarrollo tradicional del agua y la agricultura basado en el riego tiende a conducir a la extracción excesiva de agua derivada del medio ambiente a medida que el uso del agua se eleva a un nivel insostenible. Este comportamiento se remedia tradicionalmente manteniendo la producción agrícola mientras se reinvierte en eficiencia y recursos hídricos alternativos. Tales comportamientos efectivamente pagan dos veces por la misma capacidad de producción. Un enfoque alternativo adoptaría una vía de desarrollo diferente; un uso conjunto de agua de riego (azul) y agua de suelo de temporal (verde) para proporcionar una producción confiable, lo que significa que el "agua virtual" exportada en cultivos contiene menos agua azul. Los recursos hídricos azules pueden entonces dirigirse a actividades con un mayor costo de oportunidad (uso industrial y municipal).

## CAPÍTULO II

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 2.1. Definición del problema

Durante el último siglo la población humana en el mundo se ha cuadruplicado, lo que se traduce en un aumento en la presión sobre los recursos naturales incluido el agua, hasta alcanzar un punto en que la demanda de los mismos ha superado la capacidad regenerativa de nuestro planeta (Galli *et al.* 2012; Haberl *et al.* 2007). Se evidencia que el modelo actual de desarrollo, basado en la sobreexplotación de los recursos naturales, la degradación ambiental y marginación social, debe cambiar hacia una economía más sostenible, que garantice el bienestar humano y la equidad social, al tiempo que reduzca significativamente los riesgos ambientales y sobre todo mejore la gestión de los recursos hídricos cada vez más escasos (UNEP, 2011).

El agua, considerada como un recurso esencial para la vida, mantenimiento del bienestar humano y para garantizar el correcto funcionamiento de los ecosistemas (Falkenmark, 2003), es uno de los ejes fundamentales para alcanzar los objetivos perseguidos en una “economía verde sostenible” (UNEP, 2011). La mayor parte del agua en el mundo es actualmente consumida por la agricultura, tanto para la producción de alimentos, como para la producción de fibras vegetales, o la cada vez más frecuente producción de biocombustibles, de esta forma, alrededor del 70% del agua utilizada en el planeta es destinada de una u otra forma a usos agrarios.

La huella hídrica es el volumen de agua requerido a través de la cadena de suministro para elaborar un producto. Sin embargo, una distinción fundamental entre huella hídrica y huella de carbono radica en que el agua es un recurso local mientras que el carbono puede considerarse de nivel global. Por lo tanto, a diferencia de lo que ocurre con la huella de carbono, es necesario entender muchos más temas locales y de contexto para entender lo que implica la huella hídrica, así como el agua virtual (WWF-Perú, 2013).

Sin embargo no se cuenta con un método práctico y operativo para la estimación de la huella hídrica, la mayor parte de los existentes se basan en información directa, que en muchos casos no está disponible y es por lo general de alto costo, por lo cual se buscó formular un modelo conceptual operativo para este fin.

En el caso de la región Puno, la mayoría de cultivos andinos se producen en condiciones de secano, por lo que la época de cultivo coincide con la presentación de lluvias (meses de setiembre a marzo), entre estos cultivos tenemos a la papa, quinua, oca, cañihua, mashwa, habas, cebada, tarwi, entre otros, los cuales presentan diferentes consumos de agua para su producción (huella hídrica), así mismo parte de estos productos son trasladados para su comercialización hacia la ciudad de Arequipa, donde existe un mercado para su consumo, de esta forma existe un traslado o movimiento de agua en estos productos, lo cual se denomina agua virtual, por lo que estudiar tanto la huella hídrica de los principales cultivos andinos de la región Puno y estimar como parte de la misma es trasladada a la región Arequipa, es un aspecto de interés en la actualidad donde el agua se ha convertido en un recurso escaso y es necesario conocer su dinámica en sistemas tan frágiles como son los de la zona andina, partiendo de la conformación singular de carácter endorreico de la cuenca del Titicaca.

## **2.2. Planteamiento del problema**

En tal sentido planteamos las siguientes interrogantes:

General:

¿Cuál es la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno comercializados en la región Arequipa?

Específicas:

- ¿Es posible formular un modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno?
- ¿Cuál es la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno?
- ¿Cuál es el volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos?
- ¿Cuál es el valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos?

## **2.3. Justificación**

La disponibilidad de agua para fines agrícolas en la región Arequipa se hace cada vez más escasa, por su ubicación geográfica las lluvias son muy localizadas y de bajo aporte para

sostener una agricultura intensiva en condiciones de secano (75 mm al año), por lo que su sector agrario utiliza mayormente agua de represas mediante diversas tecnologías de riego. Sin embargo, en la región Puno existe una mayor disponibilidad de agua sobre todo en la época lluviosa, que en promedio es de 696 mm acumulados al año (SENAMHI, 2016), en donde la producción de los cultivos andinos se realiza principalmente con dicho aporte de agua (agua verde), parte de esta agua viaja de forma virtual a la región Arequipa contenida en diversos productos agrícolas, básicamente de cultivos andinos. Actualmente se comercializan diversos productos agrícolas de la región Puno en la ciudad de Arequipa (SISAP, 2018), entre ellos destacan la papa, quinua, oca, habas, tarwi, mashua, cebada y otros, sobre todo por existir una fuerte migración de pobladores de dicha región hacia Arequipa, que prefieren consumir dichos productos.

Actualmente se desconoce la cantidad de agua que se intercambia mediante los cultivos andinos desde la región de Puno hacia la ciudad de Arequipa, cuyo conocimiento lo consideramos importante para tomarlo en cuenta en la gestión de los recursos hídricos en la zona sur del Perú, específicamente contribuirá en la determinación del balance hídrico agrícola. En este sentido la presente propuesta investigativa es de interés actual, ya que permitirá conocer inicialmente la huella hídrica de los principales cultivos andinos de la región Puno, calculados mediante un modelo conceptual apropiado, validado y coherente, seguidamente estimar el agua virtual que se traslada en dichos productos, así como su cuantificación económica monetaria, resultados que finalmente permitirán comprender este medio de intercambio hídrico, cuyas conclusiones proporcionando en el futuro una mejor gestión del agua en la región sur del Perú, sobre todo identificando cultivos de bajo consumo de agua y promoviendo el intercambio de otros productos de mayor consumo del mismo y viceversa.

## **2.4. Objetivos de la investigación**

### **2.4.1. Objetivo general**

Determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno comercializados en la región Arequipa.

### **2.4.2. Objetivos específicos**

- Formular un modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.
- Determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.

- Estimar el volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.
- Estimar el valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.

## **2.5. Hipótesis de la investigación**

### **2.5.1. Hipótesis general**

Considerando los valores de las variables requeridas por el modelo CROPWAT – FAO es posible determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno comercializados en la región Arequipa.

### **2.5.2. Hipótesis específicas**

- Las variables climáticas, de suelo y cultivo permiten formular un modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.
- A mayor consumo de agua es mayor la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.
- A mayor huella hídrica es mayor el volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos.
- A mayor huella hídrica existe un mayor valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.



## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de estudio

El estudio consideró dos lugares de trabajo investigativo, como son la región de Puno y la ciudad de Arequipa, en el primero se realizó los cálculos de huella hídrica para los principales cultivos andinos (nueve), mientras que en la región Arequipa se levantó información de primera mano de la comercialización de los cultivos andinos en dicho ámbito y sus volúmenes respectivos, lo que permitió posteriormente calcular el agua virtual trasladada, así como el aspecto valorativo económico en términos de costo del recurso agua.

Región Puno: Está ubicado al sur del Perú, limitando al norte con la región Madre de Dios, al este con el país de Bolivia y el lago Titicaca, al sur limita con la región Tacna, al suroeste con la región Moquegua y al oeste con la región Arequipa y Cuzco. Presenta un área de 72 000 km<sup>2</sup> y es el cuarto departamento más extenso. La georeferenciación es 13°00'66"00" y 17°17'30" de latitud sur y los 71°06'57" y 68°48'46" de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

Región Arequipa: El departamento de Arequipa está ubicado en el sur del país, con las siguientes coordenadas geográficas: 70°48'15" a 70°05'52" de latitud oeste y 14°36'06" a 17°17'54" de latitud sur; limita con los departamentos de Ica, Ayacucho, Apurímac, Cusco, Puno y Moquegua, en una longitud de 1 071 kms. Por sus linderos nor-este y sur, por el oeste presenta un extenso litoral al Océano Pacífico de 528 kms., representando el 18.1% de la longitud de la costa peruana.



Figura 1. Mapa de ubicación de la región Puno y flujo de agua virtual hacia Arequipa

### 3.2. Población y tamaño de muestra

**Población:** Se consideró como población todos los cultivos agrícolas de la región Puno, los que están formados por cultivos andinos y cultivos de ceja de selva.

**Muestra:** Se consideró como muestra representativa de los cultivos andinos a nueve de ellos, caracterizados por su mayor área de cultivo en la región, así como por haberse verificado su comercialización en la ciudad de Arequipa.

Tabla 1  
Cultivos andinos considerados en el estudio

Cultivo	Nombre científico	Rendimiento (Kg/Ha)*
Papa	<i>Solanum andigenum</i>	10,987.48
Oca	<i>Oxalis tuberosa</i>	7,803.77
Olluco	<i>Ullucus tuberosus</i>	6,350.24
Haba**	<i>Vicia faba</i>	7,033.33
Tarwi	<i>Lupinus mutabilis</i>	929.63
Quinua	<i>Chenopodium quinoa</i>	1,139.58
Kañiwa	<i>Chenopodium pallidicaule</i>	927.83
Cebada**	<i>Hordeum vulgare</i>	1,474.33
Mashua	<i>Tropaeolum tuberosum</i>	7,032.22

\*Promedio de los años 2014 al 2016 (Fuente: Dirección Regional Agraria Puno)

\*\*Cultivos introducidos

### 3.3. Métodos

#### 3.3.1. Formulación de un modelo conceptual para la determinación de la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.

El modelo conceptual de huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno, tuvo por objetivo identificar y explicar los componentes más importantes que deben ser considerados en su estimación, así como identificando sus atributos y las relaciones entre los mismos.

Para el logro de este objetivo se utilizó la técnica del diagrama de entidad y relación (DER), esta técnica permitió generar un modelo que reflejó la representación de las entidades relevantes de un sistema para estimar, en nuestro caso, la huella hídrica de los nueve cultivos andinos seleccionados de la región Puno, además el modelo permitió identificar las interrelaciones entre las variables y sus respectivas propiedades. Los pasos seguidos en este proceso se pueden resumir en: 1) Se elaboró el diagrama (o diagramas) entidad-relación y 2) Se completó el modelo con listas de atributos y una descripción de restricciones que no se pueden reflejar en el diagrama. El esquema básico inició con el siguiente diagrama:

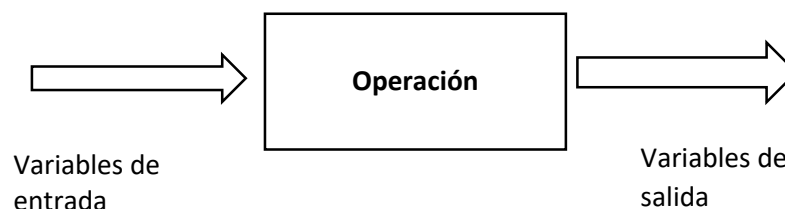


Figura 2. Diagrama inicial del modelo conceptual del cálculo de huella hídrica

#### 3.3.2. Método para determinar la huella hídrica

El método consistió en determinar la cantidad de agua empleada para producir el producto comercializable de los cultivos andinos en la región Puno. Inicialmente se realizó el análisis de los últimos 30 años de información climática, considerando la evaluación de climadiagramas.

Fundamento: La metodología para obtener la huella hídrica fue mediante la propuesta de Chapagain y Hoeskstra (2004), la cual se inicia con la obtención de los registros climáticos de la región de estudio (Puno), los mismos que sirvieron para determinar la evapotranspiración de referencia (potencial), así mismo se consideró los parámetros de los cultivos como el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), el cual

se obtuvo de la revisión de publicaciones de la FAO y de otras fuentes de estudios específicos para dichos cultivos en la región Puno, con estos parámetros se calculó la evapotranspiración del cultivo (real). Para los cálculos señalados se utilizó el software CROPWAT de la FAO, el cual permitió obtener el requerimiento de agua del cultivo (RAC), con este resultado y el rendimiento del cultivo, que fue obtenido de registros de la Dirección Regional de Agricultura (DRA-Puno), se determinó el agua contenida en el cultivo de estudio, al que se denominó huella hídrica agrícola (HHA), esta metodología también ha sido expuesta por Allan, basada en interrelaciones del clima, suelo y planta (2003) y Zhuo *et al* (2014).

El cálculo requiere, como se ha expresado, variables de entrada y como resultado se obtiene la huella hídrica, las mismas que se detallan a continuación:

VARIABLES DE ENTRADA: Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), superficie de terreno (ST), rendimiento del cultivo (RC), comercialización del cultivo ( $E_j$ ).

Modelo general:

$$Y = f(ET_0, K_c, ST, RC, E_j)$$

El modelo general incorpora las variables de entrada del modelo, donde Y es la huella hídrica de cada cultivo.

Operador: Evapotranspiración del cultivo:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

Donde:

$ET_0$ : Evapotranspiración de referencia

$K_c$ : Coeficiente de cultivo

Requerimiento de agua del cultivo:

$$RAC = ET_c \times ST \quad (2)$$

Donde:

$ET_c$ : Evapotranspiración del cultivo

ST: Superficie de terreno

Contenido de agua virtual:

$$V = \frac{RAC}{RC} \quad (3)$$

Donde:

RAC: Requerimiento de agua del cultivo

RC: Rendimiento del cultivo

Contenido de agua virtual del producto:

$$V_j = V \quad (4)$$

Donde:

V: Contenido de agua virtual

Variable de salida: Agua virtual transferida en productos de los cultivos andinos:

$$AV_t = V_j \times E_j \quad (5)$$

Donde:

Vj: Contenido de agua virtual del producto

Ej: Comercialización del cultivo

Los cálculos respectivos se realizaron siguiendo la metodología expuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), mediante el software computacional CROPWAT.

### **3.3.3. Método para estimar el volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.**

Considerando que al comercializar productos agrícolas, se debe entender que a su vez se realiza el comercio del agua que dicho producto contiene, además del agua empleada para su producción. En nuestro caso el agua viajó en los productos comercializables de los cultivos andinos hacia la ciudad de Arequipa, por lo que la información de la cantidad de producto de este tipo que se comercializa en Arequipa se tomó directamente de los registros del Ministerio de Agricultura, expresado en Ton/ha de estos cultivos promedio de los años 2014 al 2016, así como de visitas

presenciales realizadas por el investigador a los principales centros de abastos de la ciudad de Arequipa.

El agua virtual transferida en estos cultivos andinos, se determinó en función al contenido de agua virtual ( $V_j$ ) y a la comercialización del producto ( $E_j$ ), es decir esta estimación se realizó con la siguiente ecuación:

$$AV_i = f(V_j, E_j) \quad (6)$$

### 3.3.4. Método para estimar el valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.

Teniendo en cuenta que el agua tiene una connotación cualitativa, sin embargo el valor del agua se puede cuantificar, el mismo que fue medido en un valor monetario, el que fue tomado como referencia los precios fijados por el Ministerio de Agricultura en la región Puno y por una revisión exhaustiva de referencias a dicho valor en el Perú.

Para hallar el valor económico del agua virtual transferido en cada cultivo, se utilizó la siguiente función:

$$VE = AV \times C_p \quad (7)$$

Donde VE: valor económico, AV: agua virtual transferida y  $C_p$ : el costo del producto.

### Método estadístico para prueba de hipótesis

Para probar las hipótesis planteadas en el estudio se utilizó el estadístico de coeficiente de correlación lineal de Pearson, con un nivel de confianza del 95% ( $\alpha=0.05$ ). Las relaciones se realizaron para:

- Consumo de agua
- Huella hídrica
- Volumen de agua virtual
- Valor económico del agua virtual

### 3.4. Operacionalización de variables

Se consideró las siguientes variables de estudio:

Tabla 2  
*Variables y su operacionalización para el estudio*

<b>Variables Independientes</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidad</b>	<b>Tipo de variable</b>
Climáticas	Precipitación pluvial	mm	Numérica
	Temperatura	°C	continua
Edáficas	Tipo de suelo	Unidad edáfica	Categórica
Planta	Requerimiento de agua por cultivo.	mm de agua	Numérica continua
Región geográfica	Puno	Unidad	Categórica
	Arequipa	geográfica	
<b>Variables Dependientes</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidad</b>	<b>Tipo de variable</b>
Huella hídrica	Uso consuntivo de agua del cultivo.	mm de agua	Numérica continua
Agua virtual	Agua transferida en productos de cultivos andinos.	mm de agua	Numérica continua
Valor económico del agua contenida en cultivos andinos	Precio del agua virtual.	Soles	Numérica continua

### 3.5. Recolección de datos

La información de las variables necesarias para realizar los cálculos de estimación de la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno que se comercializan en la ciudad de Arequipa, fueron tomadas de diversas fuentes, siendo las principales:

- Variables climáticas (SENAMHI-Puno)
- Precipitación pluvial
- Temperatura
- Humedad relativa
- Horas de sol

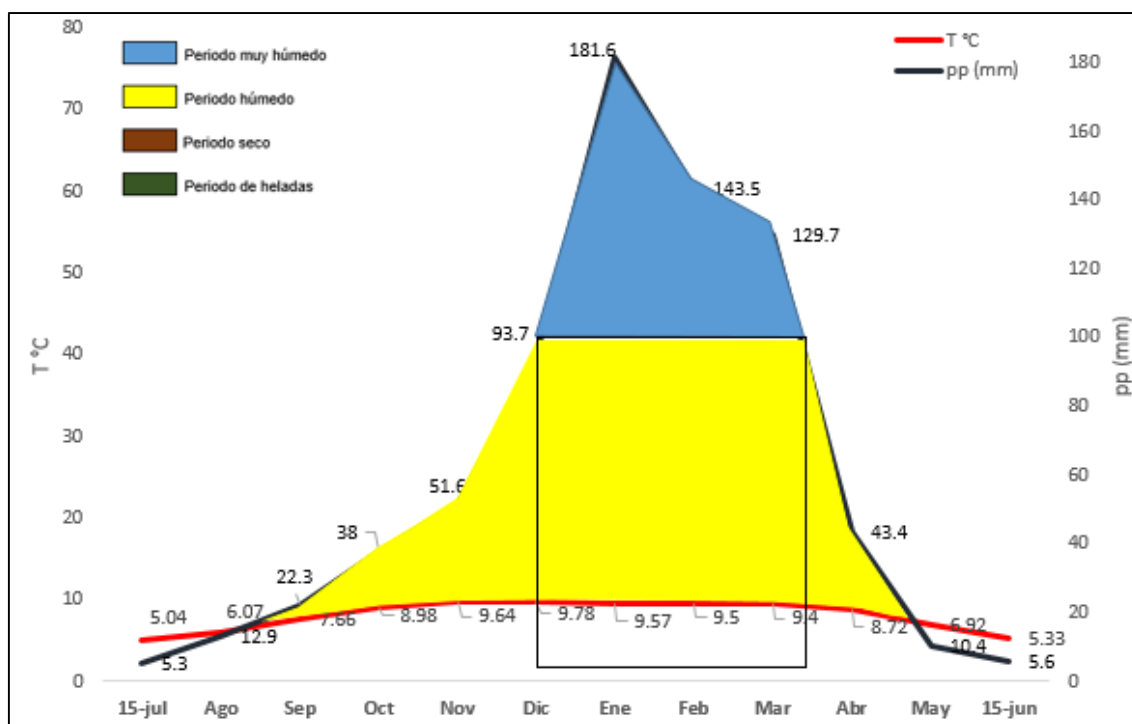


Figura 3. Climadiagrama promedio de la región Puno 2015 a 2017  
Fuente: SENAMHI, estación meteorológica CP-Puno.

La mayor cantidad de precipitación pluvial en el ámbito de estudio, se presenta en los meses de diciembre a marzo, los meses de junio y julio corresponden a presencia de heladas, mientras que el resto de meses son transitorios.

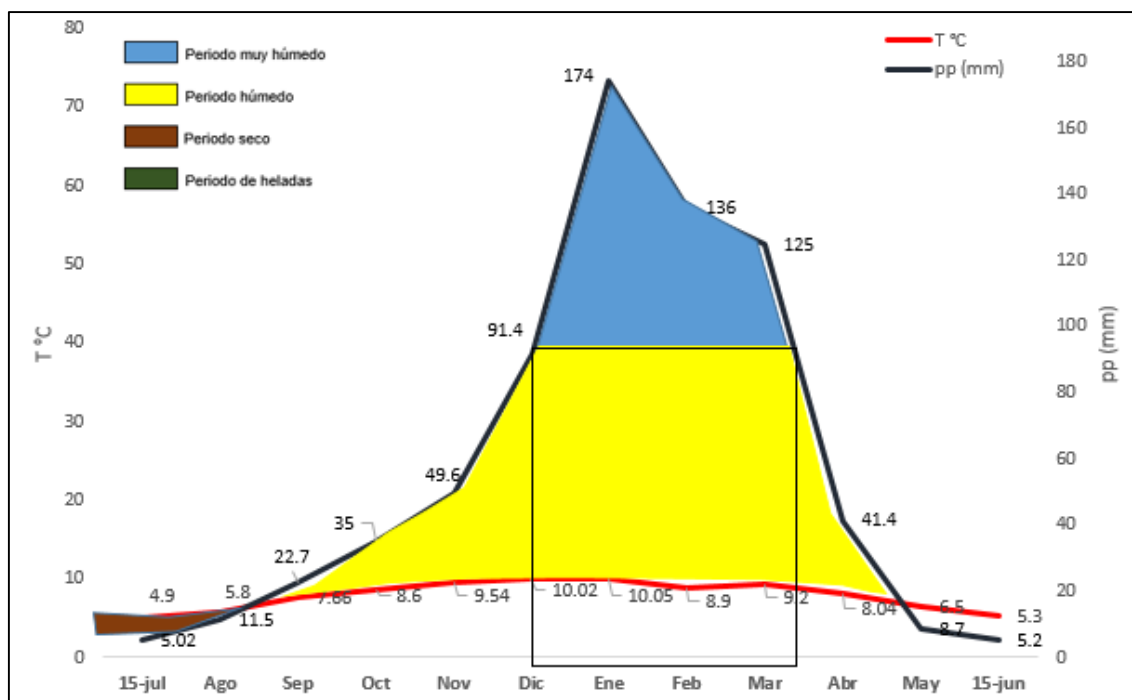


Figura 4. Climadiagrama promedio de la región Puno (30 años)  
Fuente: SENAMHI, estación meteorológica CP-Puno.



El climodiagrama en base a 30 años de registro no muestra variaciones apreciables respecto a los parámetros de precipitación pluvial y temperatura, con los analizados para los últimos tres años.

### **Variables**

- Variables agrícolas (Dirección Regional Agraria Puno, FAO)
- Rendimiento de los cultivos
- Tipo de suelo predominante
- Variables de productos comercializados (Ministerio de Agricultura)
- Volúmenes comercializados de los nueve cultivos andinos (Kg/mes)
- Precios de productos agrícolas comercializados (Ministerio de Agricultura)

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.

Para la construcción de un modelo conceptual para su aplicación en la determinación de la huella hídrica de los cultivos andinos, se inició identificando los componentes del sistema que deberían ser incluidos en el mismo:

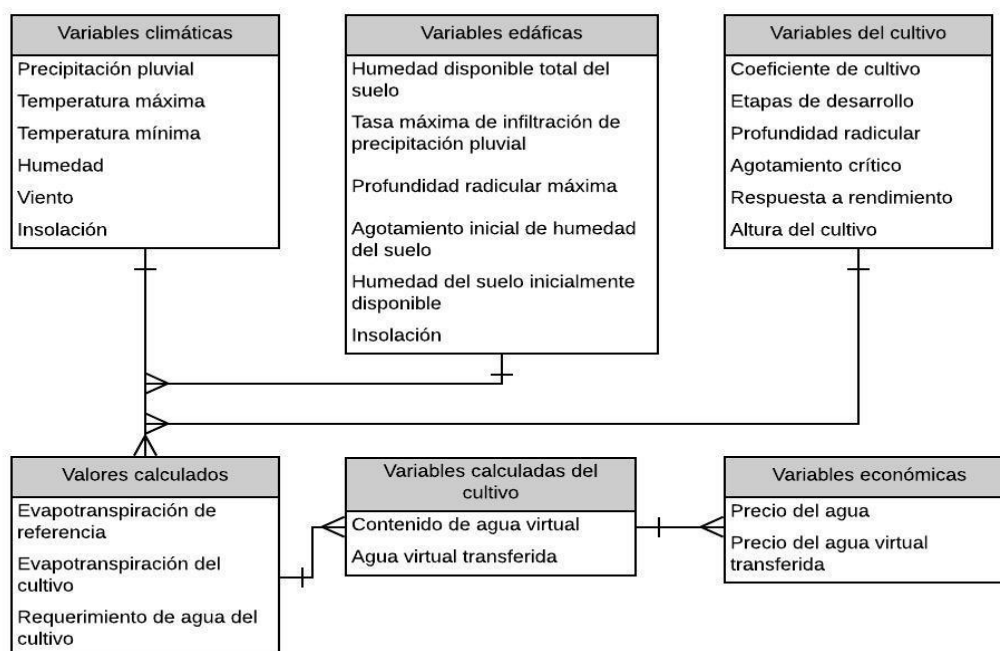


Figura 5. Diagrama de entidad y relación (DER) para determinar la huella hídrica de cultivos andinos.

La revisión de literatura al respecto y su análisis lógico, ha permitido identificar como componentes principales a cuatro variables que son: las variables climáticas, edáficas, del cultivo y económicas, así mismo se identificó dos entidades de cálculo preliminar como son: variables calculadas del cultivo y valores calculados intermedios, en este último se obtienen los valores necesarios para el cálculo ulterior de la huella hídrica.

De Santa Olalla (2005) manifiesta la existencia de modelos orientados hacia el uso del cálculo indirecto de la evapotranspiración, sin embargo indica que modelos en base a fuentes indirectas, podrían ser también útiles en casos de mediciones de éste parámetro de forma directa como los conocidos como uso consuntivo del agua (Gurovich, 1999), ambos modelos parten de los mismos principios, pero en nuestro caso se busca un modelo simple, pero operativo en la determinación de la huella hídrica, el cual puede determinar factores como la escasez del agua y también contribuir en mejorar la gestión de la producción y gestión del agua misma como lo señala también Mallma (2015).

Considerando que un modelo conceptual apropiado debe contener básicamente las variables más relevantes, se identificó que estas se pueden resumir en cuatro, las mismas que se muestran en el siguiente diagrama de entidad:

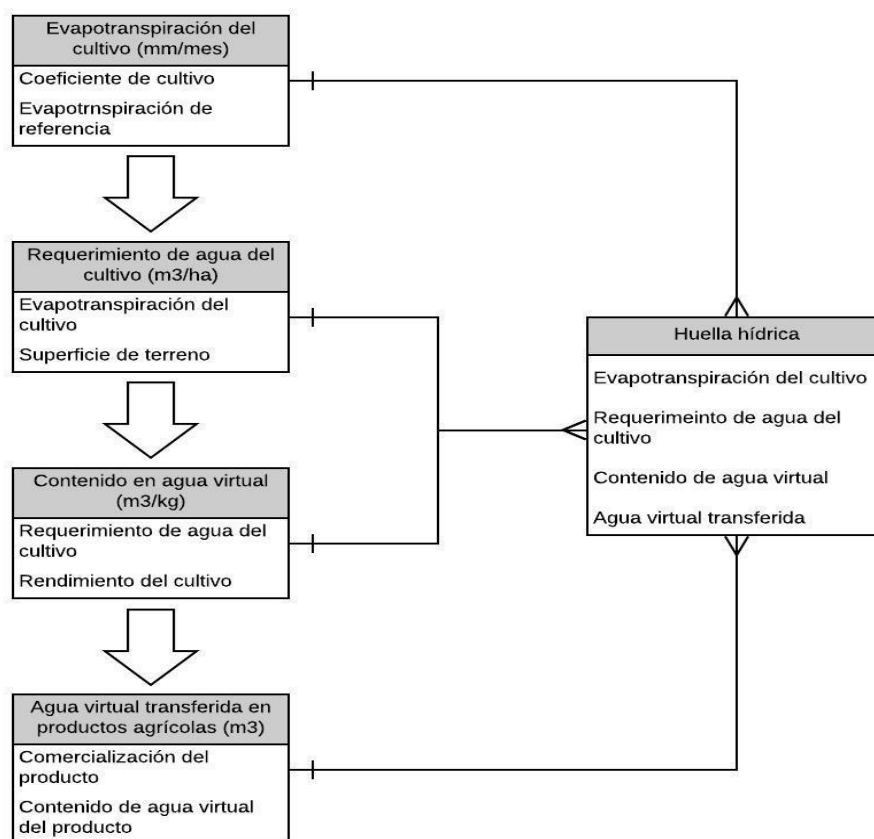


Figura 6. Diagrama de entidad y relación con lista de atributos para determinar la huella hídrica de cultivos andinos.

El componente evapotranspiración del cultivo contiene dos atributos importantes como son el coeficiente del cultivo y evapotranspiración de referencia, en ellas se manifiesta el

efecto del clima y del cultivo expresado en una relación dinámica, es decir la interrelación entre ellas que se manifiesta en la pérdida de agua que se produce en el desarrollo de la planta hasta la cosecha.

El requerimiento de agua del cultivo incorpora un atributo anterior que es la evapotranspiración del cultivo y otra como la superficie del terreno, es decir la manifestación de pérdida de agua está también en función del área ocupada por el cultivo, para simplificar cálculos se considerará como unidad la hectárea (ha).

El contenido de agua virtual puede ser en este punto ya estimada por dos atributos importantes, que son el requerimiento de agua que tiene el cultivo y el rendimiento de cada uno de ellos, lo cual explica la existencia de cultivos con requerimientos diferentes de agua para su crecimiento y desarrollo, sin embargo también existen diferencias respecto al rendimiento de cada uno de ellos en relación al área cultivada.

El otro componente de importancia, viene dado por el agua virtual transferida en productos agrícolas, debe entenderse que este componente está generalmente representado por el producto cosechable y por lo tanto transferible, es decir que es susceptible de ser comercializado, el atributo que se moviliza en el mismo en su contenido de agua interior (agua virtual).

Los cuatro componentes desarrollados anteriormente son los que en resumen serán de utilidad para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos, en estos se integra inicialmente el componente del clima que es no modificable para el presente estudio, puesto que el mismo se desarrolla con cultivos bajo condiciones de secano, es decir con el componente de agua verde (agua de lluvia almacenada en el suelo); así mismo incorpora el otro componente de interés como es el cultivo, en el que viene expresada la parte genética y su expresión en su crecimiento y desarrollo, incorporado sus características de consumo de agua, tal expresión genética se produce en interrelación con el medio ambiente, es decir el clima y el suelo donde se desarrollan.

Al final la expresión lineal de estas relaciones se traducen en un producto cosechable, en donde se tiene el contenido de agua que puede ser transferido a otros sistemas (agua virtual), en nuestro caso de la región Puno hacia la ciudad de Arequipa.

Finalmente la huella hídrica de los cultivos incorpora todos los pasos por los que tuvo que transitar el agua (acumulada en el suelo) hasta llegar al producto final comercializable

y transferible, entonces todo este proceso se puede resumir en el siguiente diagrama de entidad.

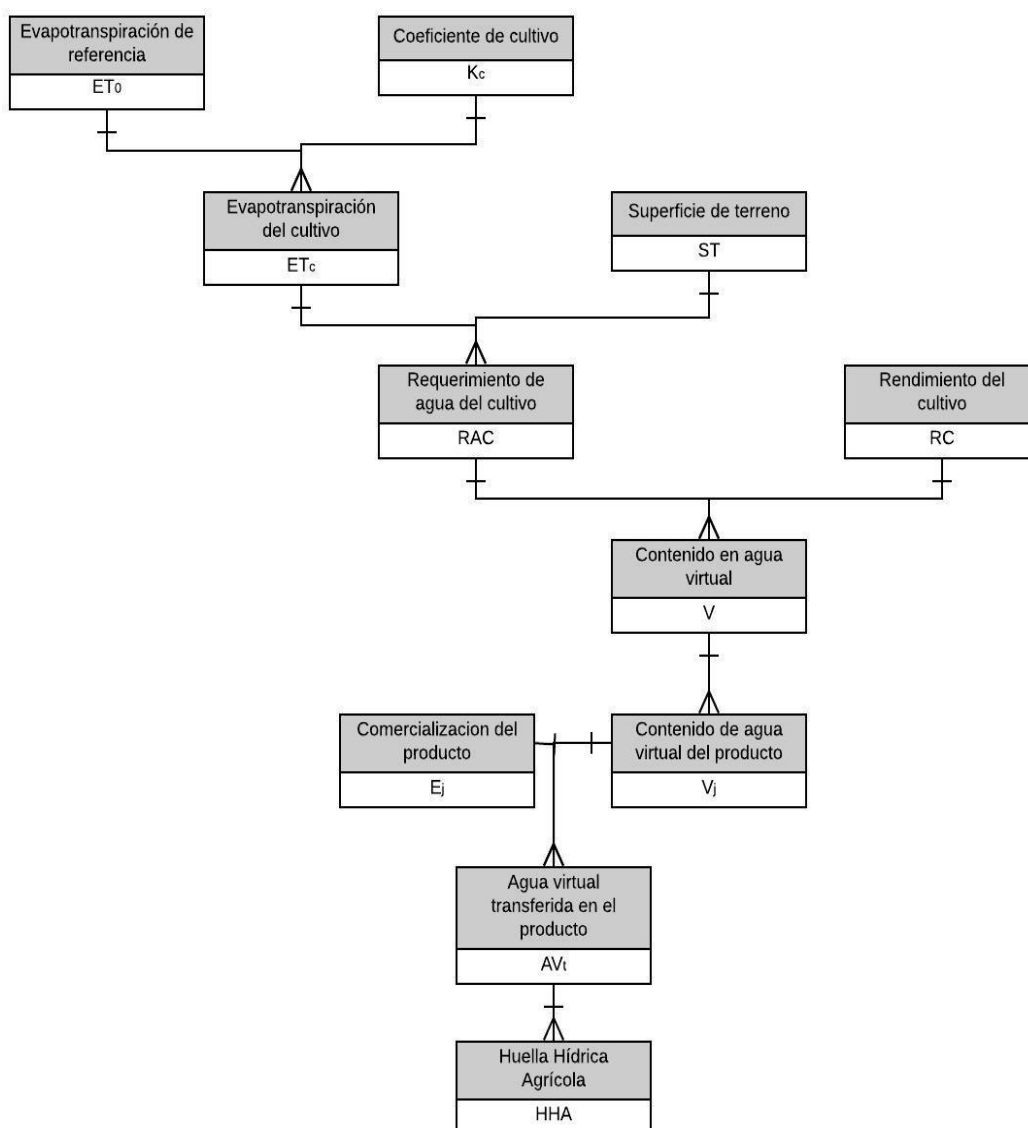


Figura 7. Diagrama conceptual final para determinar la huella hídrica de cultivos andinos.

Para lograr la operatividad del modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos, se procedió a formular un modelo lineal que permitió su cálculo numérico con las variables ya explicadas y mencionadas anteriormente. El cálculo requiere, como se ha expresado en los modelos conceptuales, variables de entrada y como resultado se obtiene la huella hídrica, las mismas que se detallan a continuación:

Modelo general:

$$Y = f (ET_0, K_c, ST, RC, E_j)$$

Donde:

Evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ )

Coefficiente de cultivo ( $K_c$ )

Superficie de terreno ( $ST$ )

Rendimiento del cultivo ( $RC$ )

Comercialización del cultivo ( $E_j$ ).

Este modelo general incorpora las variables de entrada del modelo, donde  $Y$  representa la variable de respuesta (huella hídrica) de cada cultivo andino en la región Puno, que posteriormente parte de ella será comercializada en la ciudad de Arequipa.

A partir de los hallazgos encontrados, respecto del modelo conceptual propuesto y de los diagramas de entidad, se acepta la hipótesis planteada en el estudio, es decir las variables climáticas, de suelo y cultivo permiten formular un modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.

Estos resultados guardan relación con lo que señala De Santa Olalla (2005) que indica que existen modelos orientados hacia el uso del cálculo indirecto de la evapotranspiración, sin embargo podría ser también útil en casos de mediciones de éste parámetro de forma directa. El modelo conceptual desarrollado ha sido formulado para las condiciones de cultivo en secano, que es la predominante en la región Puno, es decir con el aporte sólo de las precipitaciones pluviales que se acumulan en el suelo (agua verde), para su uso en otros casos en donde se requiera el cálculo de otros aportes de agua como el riego (agua azul), podrían incorporarse también al modelo explicado con ligeras modificaciones; por lo que existe concordancia en la aplicación de ambos modelos para la obtención de la huella hídrica.

Debe entenderse que este modelo no busca reemplazar a los modelos ampliamente conocidos en agronomía como modelos de uso consuntivo del agua (Gurovich, 1999), que parten del principio de mediciones directas de consumo de agua por las plantas, sino que busca un modelo simple que incorpore las variables básicas para su cálculo, simplificando aquellas cuya medición demandaría trabajos específicos y laboriosos, de modo que al final se obtenga un valor coherente de la huella hídrica, que establezca una relación directa entre los sistemas hídricos, los cultivos de la zona y el consumo humano, el cual puede determinar factores como la escasez del agua y puede permitir la mejora de

la gestión de la producción y gestión del agua misma como lo señala también Mallma (2015).

Una de las variables que ha sido resumida en el modelo arriba detallado es el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), donde para los cálculos se utilizó el promedio de la misma como representativo de las diferentes fases fenológicas de cada cultivo en estudio, como lo señala Gurovich (1999) define como un coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) la relación entre la evaporación de un cultivo y su evaporación potencial en un periodo de crecimiento de una etapa “fenológica” que es una evolución de una curva sigmoideal hasta llegar a un valor máximo, consideramos por ello que concordando con lo señalado por dicho autor, es factible utilizar un valor promedio como representativo del cultivo para los fines que persigue la estimación de su huella hídrica.

Por otro lado el estudio de la huella hídrica está permitiendo obtener una visión bastante más realista y optimista de una supuesta crisis del agua como lo señala Llamas (2005), por lo que consideramos que esencialmente se trata de un problema de mala identificación y gestión de este recurso, por lo tanto es posible revertirla en un mediano a largo plazo con políticas adecuadas, entre cuyas metodologías básicas de análisis se encuentra la determinación de la huella hídrica.

Es así que el modelo conceptual desarrollado aporta con una herramienta operativa de cálculo rápido de la huella hídrica de cultivos agronómicos, para que posteriormente tenga utilidad en la gestión del agua, así se puede planificar en la cedula de cultivos aquellos con poca huella hídrica, en la sierra podrían ser preferentemente sembrados en dicha zona con el aporte de las precipitaciones pluviales (agua verde) en la región Puno, mientras que otros cultivos con mayor huella hídrica podrían ser sembrados en condiciones de riego (agua azul) en la región Arequipa y también posteriormente ser exportados hacia la región Puno, es decir un intercambio de productos con optimización de uso de agua, que ha sido mencionado como estrategia de usos de agua también para otras latitudes con escasez regional de agua, concordando con nuestros resultados como lo ha señalado Van Hofwegen (2004).

La Ley de aguas en el Perú señala que tácitamente “el agua tiene valor sociocultural, valor económico y valor ambiental, por lo que su uso debe basarse en la gestión integrada y en el equilibrio entre estos. El agua es parte integrante de los ecosistemas y renovable a través del ciclo hidrológico”, partiendo de este principio el modelo planteado y

desarrollado cubre esos principios básicos, pues incorpora también el aspecto económico y social, como es la comercialización de los productos de los cultivos andinos, por lo que la valorización del agua como un recurso limitado es una parte importante de todo estudio de balance hidrológico específico, que para el caso del Perú ha sido también señalado por Chang-Navarro *et al* (2010).

Finalmente respecto al modelo propuesto, como lo señala Cardona *et al.* (2013), es necesario tener una visión de sustentabilidad del recurso hídrico y uno de los pasos más importantes, está en medir la huella hídrica en la planificación de producción de productos y también de servicios, así como en el ordenamiento territorial, por lo que este modelo cumple con este propósito inherente a la gestión optimizada de un recurso tan importante como el agua, partiendo del principio que no se puede tomar decisiones sin conocer los aspectos más profundos de las interrelaciones del agua tanto a nivel regional como local.

## **4.2. Huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.**

### **4.2.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia**

La evapotranspiración de referencia fue calculada utilizando los últimos nueve años de registro de información meteorológica para la región Puno, considerándola como representativa de las condiciones ambientales actuales del clima, la misma se realizó mediante cinco métodos de estimación indirecta, añadiendo un valor promedio de los mismos como expresión del valor de las condiciones ambientales de la región Puno.



Tabla 3

*Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por diferentes métodos (mm/mes), Estación meteorológica CP-Puno promedio 2010-2018*

Mes	Método de Hargreaves (2006)	Método de Penman Monteith (1990)	Método de Penman Modificado (1998)	Método de Linacre (1977)	Método de Papadakis (1980)	Promedio
Enero	92.50	102.88	158.82	96.50	42.56	98.65
Febrero	86.16	87.74	133.66	84.68	39.80	84.74
Marzo	79.89	94.48	138.59	92.58	39.86	89.08
Abril	76.04	91.78	129.89	90.73	44.86	86.17
Mayo	67.62	89.12	110.20	92.02	47.35	81.26
Junio	64.85	85.70	104.04	91.39	51.69	79.12
Julio	65.99	90.15	112.31	94.96	50.24	82.73
Agosto	74.74	97.14	126.77	97.50	50.07	89.24
Setiembre	83.67	102.52	139.33	95.94	48.22	93.40
Octubre	98.07	124.21	176.10	104.05	52.93	111.07
Noviembre	100.83	118.95	166.68	98.15	50.40	106.35
Diciembre	96.23	111.33	176.59	95.42	41.87	104.29

Los resultados de las estimaciones de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) para la zona andina de la región Puno, señalan que la cantidad de agua transferida del suelo a la atmosfera por evaporación y transpiración de las plantas, presentó un valor mínimo en el mes de junio con 79.12 mm coincidente con la época de estiaje, mientras que su máximo valor se presentó en el mes de octubre con 111.07 mm.

Como lo señala Serruto (2003), se debe considerar que los métodos de estimación indirecta de la evapotranspiración de referencia, se realizan en base a la temperatura, radiación solar, humedad y velocidad del viento, estos métodos han sido validados y considerados útiles para los fines de cálculo de estimación de la huella hídrica de cultivos, por lo que concuerda con nuestros resultados sobre la utilidad de dichos métodos indirectos. Además el uso generalizado a nivel global de las mencionadas metodologías, queda claro que su probada utilidad es aceptada desde mucho tiempo atrás como lo señala Hargreaves (1975).

Con los resultados anteriores, se procedió a determinar la evapotranspiración de referencia para cada uno de los nueve cultivos andinos en estudio, además de presenta sus respectivos coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>):

Tabla 4

Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por cultivo (mm) y coeficiente de cultivo (k<sub>c</sub>), Puno promedio 2010-2018

Familia	Cultivo	Nombre científico	Meses de cultivo	ET <sub>o</sub> (mm)	K <sub>c</sub> *
Tuberosas	Papa	<i>Solanum andigenum</i>	6.0	569.29	1.17
	Oca	<i>Oxalis tuberosa</i>	6.5	619.29	0.88
	Olluco	<i>Ullucus tuberosis</i>	7.0	680.36	0.70
Fabáceas	Mashua	<i>Tropaeolum tuberosum</i>	6.5	619.29	0.87
	Haba	<i>Vicia faba</i>	5.0	505.11	0.81
Quenopodiaceas	Tarwi	<i>Lupinus mutabilis</i>	5.0	513.76	0.73
	Quinua	<i>Chenopodium quinoa</i>	6.0	594.19	1.04
Cereales	Kañiwa	<i>Chenopodium pallidicaule</i>	6.0	594.19	0.92
	Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	6.0	594.19	0.70

En el altiplano peruano la mayoría de cultivos tienen un periodo de cultivo supeditado básicamente a los meses con presencia de precipitación pluvial, por lo cual utilizan la humedad acumulada en el suelo a partir de lo que se ha denominado agua verde, por lo que las variaciones del periodo fenológico entre estos cultivos son mínimas, estando la mayoría de ellas comprendidas entre 5 a 6 meses de desarrollo.

Los resultados permiten identificar que la evapotranspiración de referencia estimada, presenta variaciones mínimas entre cultivos, atribuible a que son manifestaciones de la latitud geográfica donde nos encontramos, así como de los valores meteorológicos propios en la región Puno.

Adicionalmente se realizó una revisión exhaustiva de diferentes fuentes bibliográficas de los valores de los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>), para todos los nueve cultivos andinos considerados en el estudio, todos estos fueron obtenidos para las condiciones de cultivo en la región Puno y en este caso si presentaron variaciones apreciables atribuibles a su componente genético traducido en su fisiología de desarrollo (Gracia, 1992; Vasquez y Chang, 1992). Los valores promedio de K<sub>c</sub>, para el cultivo de papa se tomó de Canllahui (2013), para oca de Calapuja (2012), para el olluco de Valle (2017), para la haba de Machaca (2011), para el tarwi de Mollinedo (2012), para la quinua García (2012).

#### 4.2.2. Evapotranspiración del cultivo (ETc) y requerimiento de agua del cultivo (RAC)

Los componentes de evapotranspiración del cultivo, así como el requerimiento de agua de los mismos, expresan el componente de la interacción de la planta y el ambiente en el que se desarrollan, pero supeditadas al periodo fenológico de cada cultivo, que en el altiplano peruano se ve afectado principalmente por la duración de la época lluviosa.

Tabla 5

*Evapotranspiración del cultivo (ETc) y requerimiento de agua del cultivo (RAC-Huella hídrica) para nueve cultivos andinos de la región Puno*

Familia	Cultivo	Nombre científico	Meses de cultivo	ETc (mm)	RAC (m <sup>3</sup> /ha)
Tuberosas	Papa	<i>Solanum andigenum</i>	6.0	666.07	6,660.69
	Oca	<i>Oxalis tuberosa</i>	6.5	544.98	5,449.75
	Olluco	<i>Ullucus tuberosus</i>	7.0	476.25	4,762.52
	Mashua	<i>Tropaeolum tuberosum</i>	6.5	538.78	5,387.82
Fabáceas	Haba	<i>Vicia faba</i>	5.0	409.14	4,091.39
	Tarwi	<i>Lupinus mutabilis</i>	5.0	375.04	3,750.45
Quenopodaceas	Quinua	<i>Chenopodium quinoa</i>	6.0	617.96	6,179.58
	Kañiwa	<i>Chenopodium pallidicaule</i>	6.0	546.65	5,466.55
Cereales	Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	6.0	415.93	4,159.33

La evapotranspiración del cultivo (ETc) que es la necesidad de agua que requiere el cultivo para su desarrollo, presenta variaciones atribuibles al componente genético de la especie y la interrelación con el ambiente, así tenemos que la mayor evapotranspiración la realiza el cultivo de la papa con 666.07 mm, mientras que la menor evapotranspiración se produce en el cultivo del tarwi con 375.04 mm, el resto de cultivos se encuentran en rangos intermedios a los señalados.

Por otro lado el requerimiento de agua del cultivo (RAC) es interpretado como la huella hídrica del cultivo, que se interpreta como la cantidad neta de agua necesaria para producir el producto cosechable, también presenta variaciones, así tenemos que el cultivo de la papa es el que requiere mayor cantidad de agua con 6660.69

$\text{m}^3/\text{ha}$ , mientras que el menor requerimiento lo presenta el cultivo de tarwi con  $3750.45 \text{ m}^3/\text{ha}$ , la parte restante de cultivos andinos presentan requerimientos en rangos intermedios a los indicados.

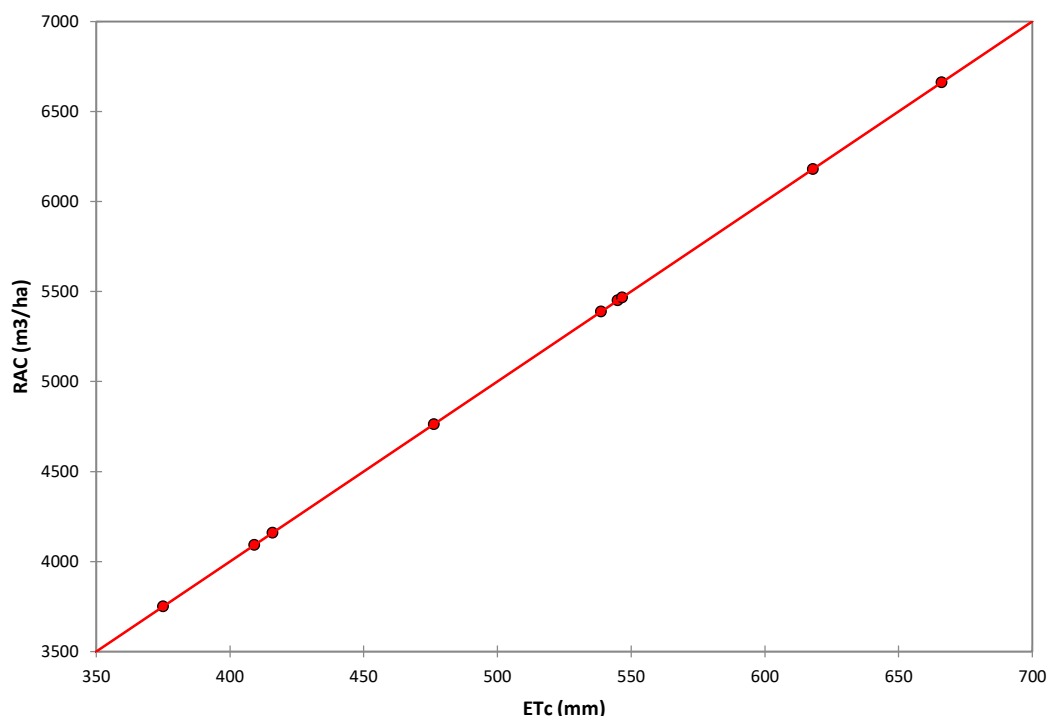


Figura 8. Relación entre consumo de agua ( $\text{ETc}$ ) y huella hídrica (RAC) de los cultivos andinos de la región Puno.

Los resultados de relación señalan una relación directa entre el consumo de agua y la huella hídrica, lo cual se debe a que los mismos dependen del valor de la superficie de terreno, que para el modelo propuesto es una constante (1 ha), puesto que:

$$\text{RAC} = \text{ETC} \times \text{ST}$$

Dónde:

RAC: Requerimiento de agua del cultivo

$\text{ETc}$ : Evapotranspiración del cultivo

ST: Superficie de terreno

De los resultados de dicha relación se obtiene un coeficiente de correlación lineal de  $r=1$  y estadísticamente significativo ( $p < 0.05$ ), de lo cual se acepta la hipótesis planteada: a mayor consumo de agua es mayor la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.

#### 4.2.3. Superficie de terreno (ST)

Para este componente de la huella hídrica, se debe considerar la superficie cultivada de los nueve cultivos andinos en estudio, cuya información se obtuvo directamente de la Dirección Regional Agraria de Puno, para simplificar los cálculos se utilizó como unidad de producción 1 hectárea, para luego realizar la determinación para el área cultivada total.

#### 4.2.4. Rendimiento del cultivo (RC) y contenido de agua virtual

El rendimiento de los cultivos y el contenido de agua virtual en los mismos fue el siguiente:

Tabla 6

*Rendimiento promedio de nueve cultivos andinos y agua virtual (Vj) en la región Puno*

Familia	Cultivo	Nombre científico	Rendimiento Kg/ha	D.E Kg/ha	Agua virtual (lt/kg)
Tuberosas	Papa	<i>Solanum andigenum</i>	11,911.37	403.08	559.19
	Oca	<i>Oxalis tuberosa</i>	8,243.5	250.80	661.10
	Olluco	<i>Ullucus tuberosus</i>	6,627.2	223.67	718.63
	Mashua	<i>Tropaeolum tuberosum</i>	7,477.3	183.92	720.56
Fabáceas	Haba	<i>Vicia faba</i>	5,693.8	233.11	718.57
	Tarwi	<i>Lupinus mutabilis</i>	1,287.7	48.73	2912.52
Quenpodaceas	Quinoa	<i>Chenopodium quinoa</i>	1,065.8	75.35	5798.06
	Kañiwa	<i>Chenopodium pallidicaule</i>	791.5	28.51	6906.57
Cereales	Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	1,071.6	49.28	3881.42

Fuente: DRA Puno, (2018)

El mayor rendimiento se observa en el cultivo de la papa con promedio de 11,911.37 kg/ha, mientras que el menor rendimiento lo produce el cultivo de la kañiwa con 791.5 kg/ha, se observa que los cultivos con mayor consumo de agua son también en términos generales los que tienen mayor rendimiento de producto cosechable, del modo inverso aquellos con menor consumo de agua tienen un rendimiento menor, atribuible al aspecto fisiológico de las plantas y su capacidad de adaptarse a la disponibilidad de agua en la región Puno. Sin embargo también debe entenderse que un bajo rendimiento puede estar asociado a una baja tecnología agronómica, así como a una falta de mejoramiento genético de variedades de mayor producción.

El agua virtual se entiende como la cantidad de agua total contenida en el producto cosechable y su importancia radica en que este tipo de agua es susceptible de ser movilizadada en cualquier ámbito geográfico, así tenemos que es un tipo de agua propio de una región que puede ser movilizadado a otra región, es decir tiene un carácter regional propio.

Según los resultados, los valores de agua virtual para el presente estudio son entendibles como la huella hídrica de los cultivos en lo referente al producto cosechable, como lo señala Arévalo *et al.* (2011) esta huella incorpora el volumen de agua utilizada directa o indirectamente para su producción, en el caso de los cultivos andinos estudiados la fuente de agua única es la precipitación pluvial (agua verde), almacenada en el suelo, por lo que los cálculos necesarios son menos engorrosos como el que requeriría un modelo mixto.

Así mismo Chouchane *et al.* (2014) señala que la papa y el tomate presentan alta productividad del agua (bajo consumo), mientras que las aceitunas y la cebada con baja productividad (alto consumo), nuestros resultados para el caso de la papa corroboran esos resultados, puesto que dicho cálculo está en función del rendimiento de los cultivos analizados, esto se explica porque cultivos como la Kañiwa presenta una huella hídrica alta, puesto que su rendimiento es bajo, debido al poco trabajo de mejoramiento que ha tenido el mismo, tanto en la tecnología de cultivo como genético, mientras que la papa que es un cultivo que cuenta con variedades mejoradas y una tecnología de cultivo adecuada presenta una menor huella hídrica; aspecto que también ha sido señalado por Pengue (2004) que manifiesta que el valor del agua virtual de un producto alimenticio es el inverso de la productividad del agua, lo cual concuerda con los resultados de nuestro estudio.

En la misma línea González (2016) indica el valor promedio estimado de huella hídrica para la papa de 430,2 m<sup>3</sup>/t, que está dentro del rango obtenido en nuestro estudio, además identificamos que este cultivo es el principal, respecto al volumen que es comercializado en la ciudad de Arequipa y que procede de la región Puno.

#### 4.3. Volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.

Para la estimación del volumen de agua virtual que se ha trasladado de la región Puno hacia la ciudad de Arequipa de requirió conocer el volumen de comercialización (Ej), como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7

*Comercialización de cultivos de Puno comercializados en Arequipa y agua virtual transferida (VA<sub>t</sub>)*

Familia	Cultivo	Nombre científico	Ej (Kg)	VA <sub>t</sub> (m <sup>3</sup> )
Tuberosas	Papa	<i>Solanum andigenum</i>	259,616.88	145,175,163.13
	Oca	<i>Oxalis tuberosa</i>	2,452.42	1,621,294.86
	Olluco	<i>Ullucus tuberosis</i>	1,660.79	1,193,493.52
	Mashua	<i>Tropaeolum tuberosum</i>	1,524.21	1,098,284.76
Fabáceas	Haba	<i>Vicia faba</i>	2,524.25	1,813,850.32
	Tarwi	<i>Lupinus mutabilis</i>	1,874.52	5,459,576.99
Quenopodaceas	Quinua	<i>Chenopodium quinoa</i>	5,698.32	33,039,201.26
	Kañiwa	<i>Chenopodium pallidicaule</i>	2,254.21	15,568,859.16
Cereales	Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	3,539.72	13,739,140.00
			Total	218,708,864.00

Fuente: DRA Puno (2018)

Las cantidades de productos cosechados a partir de cultivos andinos de la región Puno que se comercializan en la ciudad de Arequipa, fue estimada consultando a entidades como la DRA de Arequipa y la realización de visitas propias a los principales mercados de abastos de dicha ciudad. El mayor volumen de comercialización está representado por la papa con 259616.88 kg, mientras que el menor volumen comercializado corresponde al cultivo de la mashua con solo 1524.21 kg.

Respecto al agua virtual transferida de la región Puno a la ciudad de Arequipa, se tiene que el mayor volumen de agua le corresponde al cultivo de la papa con 145175163.13 m<sup>3</sup>, mientras que el cultivo con menor agua transferida es el de la mashua con 1098284.76 m<sup>3</sup> de agua. Los resultados señalan un total de agua virtual transferida de la región Puno hacia la ciudad de Arequipa de 218708864.00 m<sup>3</sup> de agua.

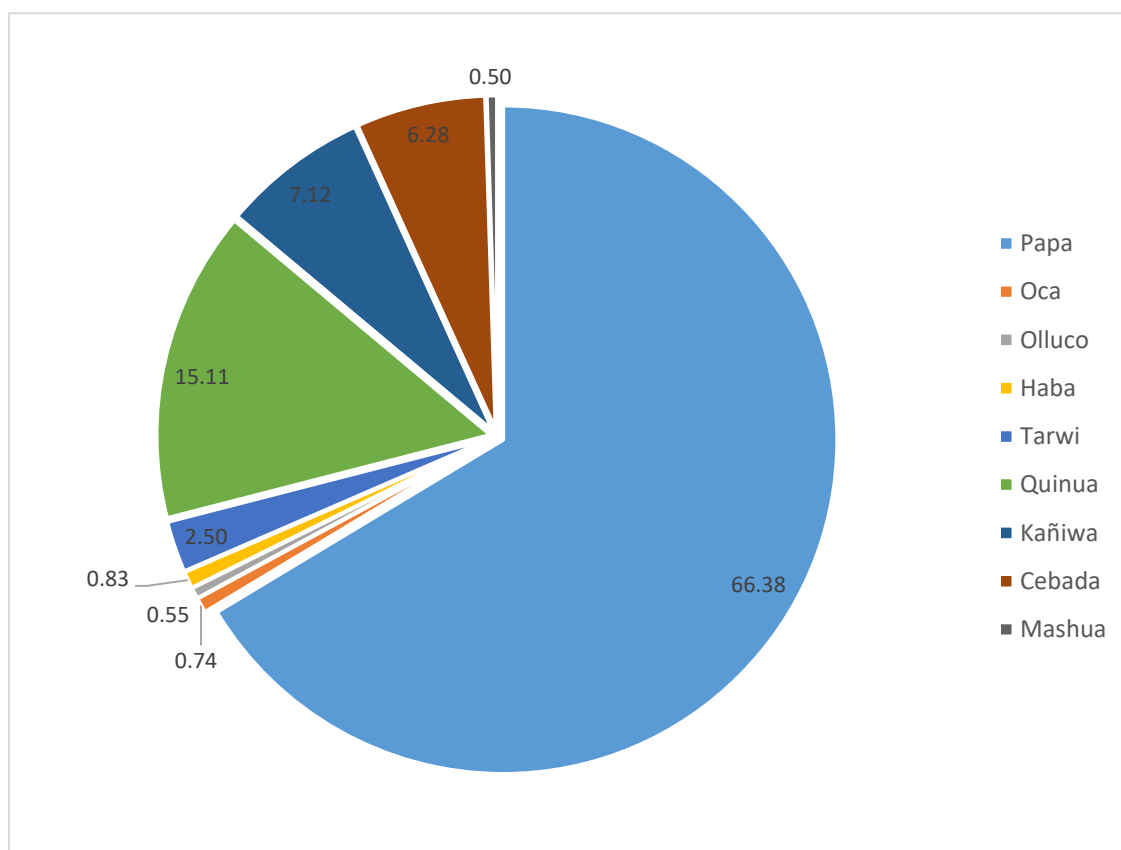


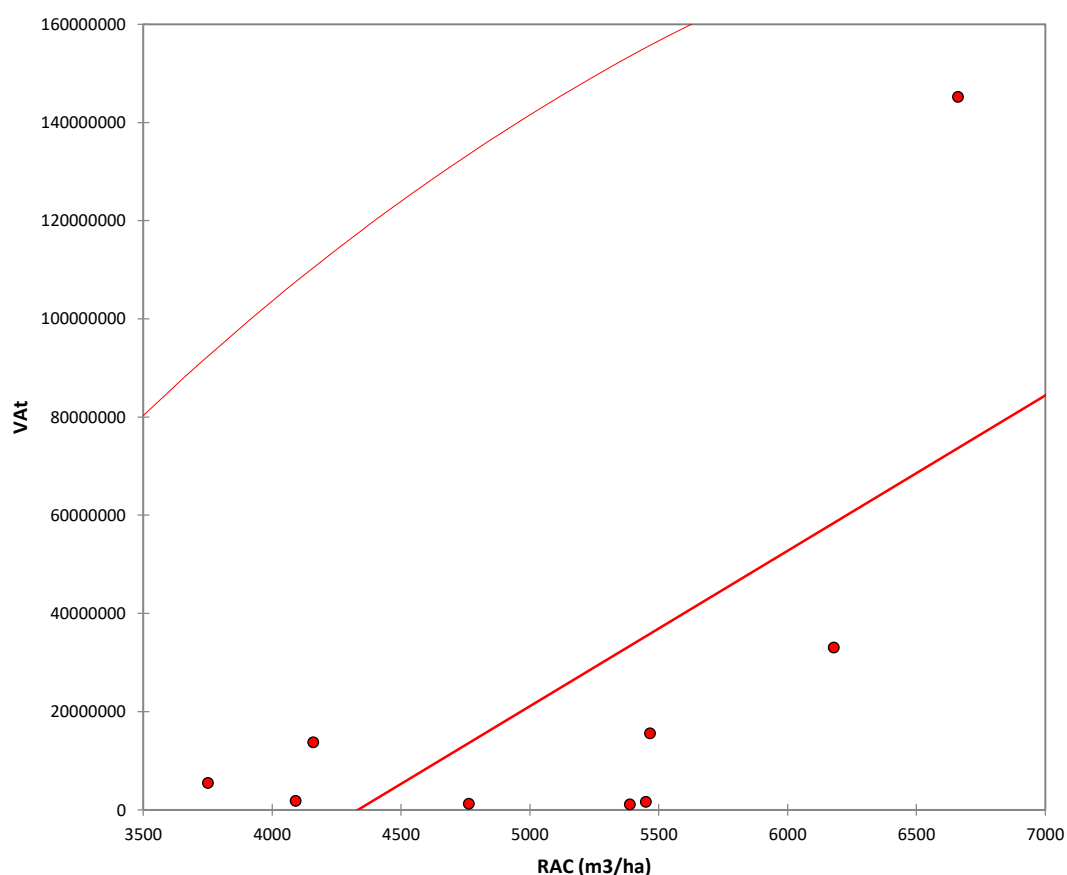
Figura 9. Distribución porcentual de la huella hídrica de cultivos andinos de la región Puno comercializados en la ciudad Arequipa.

Se tiene que en términos porcentuales la mayor huella hídrica se produce en el cultivo de la papa, puesto que en este producto se tiene el 66.38% de agua que se movilizó de la región Puno hacia Arequipa, en segundo lugar de importancia se tiene a la quinua con un 15.11% de agua movilizada, el resto de cultivos presentan menores porcentajes respecto a su contribución. La explicación de la importancia de la papa en los volúmenes de agua, radica básicamente en su mayor disponibilidad de excedentes para su comercialización, atribuible como ya se ha señalado, a su mayor área cultivada así como un mayor rendimiento en comparación al resto de cultivos andinos.

Según lo indica Gilmont, Antonelli & Greco (2016), el desarrollo tradicional del agua y la agricultura basado en el riego, tiende a conducir a la extracción excesiva de agua del medio ambiente hasta niveles insostenibles, este comportamiento se remedia tradicionalmente manteniendo la producción agrícola mientras se reinvierte en eficiencia y recursos hídricos alternativos; en el caso de nuestro estudio al parecer la forma tradicional de producción en nuestra región, supeditada específicamente a la precipitación pluvial ha permitido hasta el momento un balance hídrico en la región, aspecto que viene



siendo modificado con obras de riego, por lo que se debería realizar un análisis profundo sobre el efecto de las obras de riego en el balance hidrológico global de la cuenca del Titicaca, sobre todo por su fragilidad ya señalada (Serruto, 1992); además indicamos que debería incorporarse los resultados de nuestro estudio por el componente virtual del agua que no ha sido considerado en la mayoría de los estudios de balance hidrológico hasta la actualidad.



*Figura 10.* Relación entre huella hídrica (RAC) y volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos

La relación entre la huella hídrica y el volumen de agua virtual, indica la existencia de una relación con  $r=0.670$ , el mismo que es estadísticamente significativo ( $p<0.05$ ), de lo cual se acepta la hipótesis planteada en el estudio: a mayor huella hídrica es mayor el volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos.

Los resultados obtenidos explican claramente el predominio del cultivo de la papa como el principal producto comercializado en la ciudad de Arequipa y que proviene de la región

Puno, lo cual se explica por la mayor área cultivada de este producto, así como su mayor rendimiento como ha sido señalado en diversos estudios (Canllahui, 2013).

Como el segundo cultivo en volumen de traslado de agua se tiene a la quinua, sobre todo por su alta demanda en la ciudad de Arequipa, así mismo podemos señalar que el mismo ha tenido en los últimos años un proceso de mejoramiento genético y de su tecnología de cultivo agronómico, lo que se ha traducido en un incremento de área cultivada y también de rendimiento, por lo cual su huella hídrica es menor que el resto de productos tradicionales como la kañiwa y la mashua.

El resto de cultivos andinos tienen en promedio un menor valor de agua transferida hacia Arequipa, explicado primariamente por sus menores áreas cultivadas y sus bajos rendimientos, además de presentar una menor demanda en dicha ciudad, ya que son propios de la región andina y su consumo está restringido más en ámbitos locales focalizados.

Finalmente se concluye que los volúmenes de transferencia de agua virtual están sujetos básicamente a la demanda del producto, como lo han demostrado nuestros resultados, pero respecto a la huella hídrica de los mismos se evidencia que sobre todo su rendimiento agronómico es importante en los cálculos de huella hídrica, por lo que para el caso de estudio el cultivo de la papa es el principal producto en el que se moviliza agua virtual de la región Puno hacia la ciudad de Arequipa, como también lo es en regiones similares.

#### **4.4. Valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.**

Existe concordancia en que el agua tiene un valor económico implícito, sin embargo no existe consenso mundial sobre cuál sería un precio internacional representativo (Arévalo *et al.*, 2011)., tal es así que el mismo dependería de la disponibilidad de la misma en cualquier país, sin embargo en el Perú se han realizado estimaciones al parecer coherentes, así tenemos que para regiones similares a Puno se considera el 0.0004% de una UIT por metro cúbico (Chang-Navarro *et al.*, 2010), por lo que para los cálculos utilizamos este valor de referencia (0.0001% de UIT).

Tabla 8

Valor económico de agua virtual de cultivos andinos de Puno comercializados en Arequipa

Familia	Cultivo	Nombre científico	VAt (m <sup>3</sup> )	Valor económico (Soles)*
Tuberosas	Papa	<i>Solanum andigenum</i>	145,175,163.13	60,247,692.70
	Oca	<i>Oxalis tuberosa</i>	1,621,294.86	6,728,37.37
	Olluco	<i>Ullucus tuberosis</i>	1,193,493.52	495,299.81
	Mashua	<i>Tropaeolum tuberosum</i>	1,098,284.76	455,788.17
Fabáceas	Haba	<i>Vicia faba</i>	1,813,850.32	752,747.88
	Tarwi	<i>Lupinus mutabilis</i>	5,459,576.99	2,265,724.45
Quenopodaceas	Quinoa	<i>Chenopodium quinoa</i>	33,039,201.26	13,711,268.52
	Kañiwa	<i>Chenopodium pallidicaule</i>	15,568,859.16	6,461,076.55
Cereales	Cebada	<i>Hordeum vulgare</i>	13,739,140.00	5,701,743.10
			Total	90,764,178.56

Fuente: Chang-Navarro *et. al.*, (2010).

El valor económico del agua transferida de la región Puno hacia la ciudad de Arequipa en productos de cultivos andinos, indica que la papa es el producto donde viaja la mayor cantidad expresada en 60 247 692.70 de soles, seguida del cultivo de la quinua con 13 711 268.52 de soles, el resto de cultivos presentan contribuciones económicas intermedias a las señaladas. En total se tiene 90 764 178.56 de soles que son transferidos de forma virtual en forma de agua de la región Puno hacia Arequipa en productos de nueve cultivos andinos.

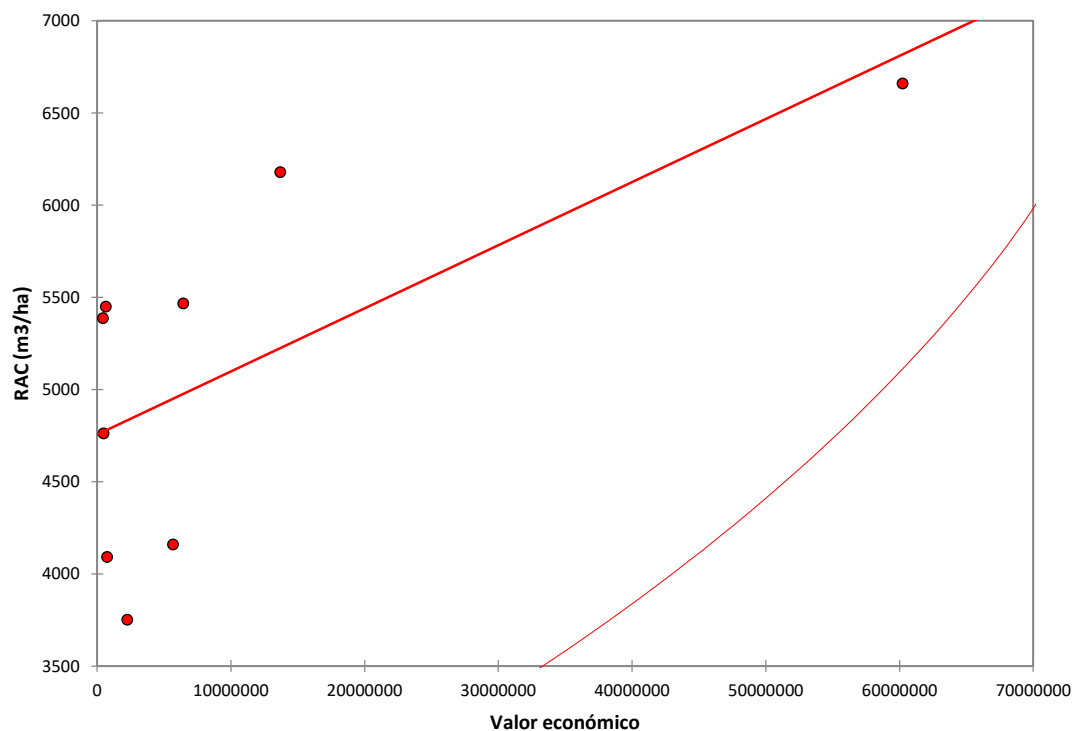


Figura 11. Relación entre huella hídrica (RAC) y valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos

La relación entre la huella hídrica y el valor económico de agua virtual, indica la existencia de una relación lineal con  $r=0.670$ , el mismo que es estadísticamente significativo ( $p<0.05$ ), de lo cual se acepta la hipótesis planteada en el estudio: a mayor huella hídrica existe un mayor valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.

Si bien no existe consenso sobre el valor económico del agua, queda claro que por su naturaleza misma esta tiene un valor implícito importante, para nuestro estudio se consideró una propuesta para las condiciones del Perú, por lo que esta información generada no estaría lejos de la realidad del uso del agua para las condiciones del estudio.

Los resultados señalan que existe un movimiento de agua virtual importante en los productos de cultivos andinos hacia la ciudad de Arequipa, considerando que esta forma de agua nunca ha sido tomada en cuenta en los balances hídricos, consideramos que toda gestión seria de recursos hídricos debería en lo futuro ser utilizada, puesto que el agua caída por precipitación en una región es propia de la misma y al viajar, aun de forma virtual, es parte integrante del balance global como lo señala Van Hofwegen (2004).

Además de los aspectos señalados se debe entender que el cálculo de la huella hídrica, permite además explicar flujos de agua de interés, así como puede indicar también el estado tecnológico de la producción de los cultivos, que como se ha señalado en términos generales las altas huellas hídricas están relacionadas a los bajos rendimientos agronómicos de la mayoría de los cultivos andinos como lo señala Mallma (2015).

De los resultados del estudio, queda claro que considerando el componente verde del agua que es utilizado en la producción de cultivos andinos, que son el producto de la adaptación de los mismos a las condiciones del clima del altiplano, sugieren inferir que una alta huella hídrica observada se explica por la relativa alta disponibilidad de agua en un periodo restringido de desarrollo (temporal), esto explica porque los cultivos producen poco producto cosechable con un alto uso de agua en nuestra región, sin embargo esta estrategia adaptativa está siendo modificada por la tecnología, así mismo tanto los resultados del estudio como otros, señalan que nuestra tecnología agrícola es aún poco eficiente y por lo tanto no podría competir en un mundo global de comercio (UNEP, 2011).

Los resultados de la huella hídrica de los principales cultivos de la región Puno, ponen en evidencia el bajo rendimiento de los mismos, lo que repercute en los cálculos de su huella hídrica, los dos cultivos más difundidos como son la papa y la quinua presentan una relativa menor huella hídrica, atribuible a la mejor tecnología generada para ellos por ser productos más comerciales que los otros y por su potencial económico en lo concerniente a su comercialización (Mallma, 2015); de lo cual se desprende la ya conocida conclusión que en la región Puno la mayor parte de su agricultura es de subsistencia y solo pequeños volúmenes sobrantes son comercializados a nivel de la región del sur del país.

Finalmente señalamos que el modelo conceptual desarrollado e implementado, ha mostrado consistencia en los resultados de los cálculos de huella hídrica para los cultivos andinos de la región Puno, si bien los cálculos indirectos serán siempre menos confiables que mediciones directas, un caso de estudio particular como el cálculo de la huella hídrica, que requiere rapidez con poco uso de recursos económicos y logísticos, presenta suficiente eficacia para la utilidad que se perseguía en el estudio.

## CONCLUSIONES

- Con la construcción de un modelo conceptual se determinó la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno, que incorpora la evapotranspiración de referencia, el coeficiente de cultivo, superficie de terreno, rendimiento del cultivo y volumen de comercialización del cultivo.
- La huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno, fue mayor en el cultivo de la papa con 6,660.69 m<sup>3</sup>/ha y con menor huella el tarwi con 3,750.45 m<sup>3</sup>/ha, con valores intermedios la oca 5,449.75; olluco con 4,762.52; haba 4,091.39; quinua con 6,179.58; kañiwa 5,466.55; cebada 4,159.33 y mashua 5,387.82 m<sup>3</sup>/ha, resultados atribuibles a la duración del cultivo y su evapotranspiración.
- El volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos, fue principalmente por el cultivo la papa con volumen de 145,175,163.13 m<sup>3</sup> y con menor volumen la mashua con 1,098,284.76 m<sup>3</sup> de agua, con volúmenes intermedios la oca 1,621,294.86; olluco 1,193,493.52; haba 1,813,850.32; tarwi 5,459,576.99; quinua 33,039,201.26; kañiwa 15,568,859.16 y cebada con 13,739,140.00 m<sup>3</sup>.
- El valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la ciudad de Arequipa, es principalmente en el cultivo de la papa con 60,247,692.70 de soles, con menor contribución la mashua con 455,788.17 de soles, con valores intermedios la oca 672,837.37; olluco 495,299.81; haba 752,747.88; tarwi 2,265,724.45; quinua 13,711,268.52; kañiwa 6,461,076.55 y cebada 5,701,743.10 soles; en general se traslada de Puno hacia Arequipa un valor de 90,764,178.56 de soles en agua virtual. Los resultados obtenidos en el presente estudio contribuirán en la administración de los recursos hídricos de la región Puno.

## RECOMENDACIONES

- Realizar estudios de estimación de la huella hídrica de productos agrícolas de la región Arequipa que ingresan a la región Puno, para determinar un balance hídrico en función del agua virtual; resultados que contribuirán la mejora de la administración de los recursos hídricos.
- Considerar los resultados del estudio para la planificación de la cedula de cultivos, considerando el consumo de agua y el rendimiento que producen, además del agua virtual que puede ser trasladado en los mismos, para optar tecnologías sostenibles de riego y tipo de cultivo en la región Puno.
- Analizar el efecto del cambio climático en los rendimientos de los cultivos, así como los efectos del mismo en sus respectivas huellas hídricas.
- Realizar estudios de economía ambiental considerando los resultados del presente estudio, respecto al traslado del agua en forma virtual entre cuencas de la región sur del Perú.
- Proponer una zonificación ecológica y económica, considerando la huella hídrica de los cultivos andinos en la región Puno.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allan, J. (2003). Virtual wáter eliminates wáter war. A case study from the Middle East. Virtual wáter trade. *Values of wáter research report series* N° 12. IHE. Holanda.
- Apaza, V. (2010). *Manejo y Mejoramiento de Kañiwa. Convenio Instituto Nacional de Innovación Agraria INIA-Puno*, Centro de Investigación de Recursos Naturales y Medio Ambiente-CIRNMA, Puno, Perú.
- Arabi, A. Alizadeh, A. Rajae, Y. Jam, K. Niknia, N. (2012). Agricultural Water Foot Print and Virtual Water Budget in Iran Related to the Consumption of Crop Products by Conserving Irrigation Efficiency. *Journal of Water Resource and Protection*, 4(May), 318–324. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.45035>.
- Arévalo, D. Lozano, J. y Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica en Colombia sector agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y humanismo*, N° 7, Cataluña, España.
- Benavides, A. León, J. y Rea J. (1966). *Características clonales del ulluco*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Informe técnico. 188 pp.
- Box, A. (2008). The biology of *Hordeum vulgare* L. (Barley). Australian Government: Departament of health and ageing. Consultado 21 jun 2014 Disponible en: <http://agencysearch.australia.gov.au/search/search.cgi?collection=agencies&profile=ogtr&query=barley&Submit=Search>.
- Canllahui, M. (2013). *Determinación de la evapotranspiración y coeficiente de cultivo (Kc) en la producción de papa (Solanum tuberosum l.) var. silver en*



- el CIP Illpa- Puno*. (Tesis) Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú 124 p.
- Calapuja, R. (2012). *Determinación de la evapotranspiración real del cultivo de la oca (Oxalis tuberosa Moll) en el CIP Illpa, Puno*. (Tesis Ingeniería agronómica). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú 90 p.
- Cárdenas, M. (1969). *Manual de plantas económicas de Bolivia*. Imprenta Icthus, Bolivia. 421 p.
- Centro Nacional de Información de la calidad – CNIC, (2012). *La huella hídrica*. Asociación española para la calidad. Madrid, España.
- Chang-Navarro, L; Salcedo, J; de la Torre, C; Pinzas, T. (2010). *La tarifa de agua con fines agrarios*. Lima, Perú. 24 p.
- Chapagain, A. y Hoekstra, A. (2004). *Water footprints of nations. Value of wáter research report series, N° 16*, UNESCO.
- Chapagain, A. y Hoekstra, A. y Savenije, H. (2006). Water saving through international trade of agricultural products. *Journal Interactive of Hydrology and earth System Sciences*, Berlin. 14 p.
- Chouchane, H. Hoekstra, A. Krol, M. y Mekonnen M. (2014). The wáter footprint of Tuinisia from an economic perspective. *Ecological Indicators Journal*. 52:311-319.
- De Santa Olalla, M. F. (2005). *Agua y Agronomía*. Editorial Mundi Prensa. España. 600 p.
- Doorembos, J. y Pruitt, W. O. (1982). *Las necesidades de agua de los cultivos*. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú 192p.
- Espinoza, M. (1988). *Cultivos andinos*. Edit. Continental. Perú. 179 p.
- Falkenmark, M. (2003) Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 29 (358(1440):2037-2049.

- FAO, (2005). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudio riego y drenaje N° 56. Roma, Italia. 322 p.
- Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF-Perú). (2015). *Huella hídrica del Perú, sector agropecuario*. Lima, Perú. 32 p.
- Galli A, Wiedmann T, Ercin E, Knoblauch D, Ewing . Giljum S. (2012). Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a "Footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. *Ecological Indicators* 16 (0):100-112.
- Garay, O. (2011). *Manual de uso consuntivo del agua para los principales cultivos de los Andes Centrales Peruanos*. Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú. 34 p.
- García, V. J. (1992). *Agro meteorología*. Editorial E. Martell. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima Perú. 176 p.
- Gilmont, M. Antonelli, M. Greco, F. (2016). Opportunity costs of virtual water: a justification for green-water based agricultural capacity growth for economic, social and environmental sustainability. *Environmental Change Institute*, 1(1), 1–14.
- González, M. (2016). *Análisis comparativo de la huella hídrica en agroecosistemas de la microcuenca Alto Rio Ubaté*. Universidad nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/54617/>.
- Grace, B. (1988). *El clima del altiplano*. Departamento de Puno. INIPA-CIPA, Puno, Perú.
- Haberl H. Heinz. Krausmann F. Gaube V. Bondeu A. Plutzar C. Gingrich S. Lucht W. Fischer-Kowalski M (2007). Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems. *PNAS* 104 (31):12942-12947.
- Hargreaves, H. G. (1975). "Manual de requerimiento de agua para los cultivos bajo riego y la agricultura bajo secano". AID, de los EE.UU. de Norte América 37p.

- Hoekstra, A. Chapagain, A. Aldaya, M. y Mekonnen, M. (2009). *Water footprint Manual*. USA.
- INIAP, (2012). *Estudios sobre chips de oca y mashua como alternativa de consumo*. Recuperado el 2017 de <http://www.iniap.gob.ec/>
- León, J. (1964). *Plantas alimenticias andinas*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Boletín Técnico N° 6. 122 p.
- Llamas, M. (2005). Los colores del agua, el agua virtual y los conflictos hídricos. *Revista Académica de Ciencias Exactas de Física Natural*. Madrid. España. 30 p.
- Machaca, L. (2011). *Determinación de las necesidades de agua del cultivo haba baby mediante lisímetros de drenaje en la irrigación Majes – Arequipa*. (Tesis Ingeniero Agrícola), Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú 125 p.
- Mallma, T. (2015). *Huella hídrica de los productos agrícolas de la región Junín comercializadas en la ciudad de Lima*. (Tesis), Universidad Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Mekonnen, M. y Hoekstra, A. (2011). The Green, blue and grey wáter footprint of crops an derived crop products. *Journal Interactive of Hydrology and Earth System Sciences*. Berlin. 24 p.
- Molina, J. (2014). *Los recursos hídricos del sistema TDPS*, en Línea de base de conocimientos sobre los recursos hidrológicos e hidrobiológicos en el sistema TDPS con enfoque en la cuenca del lago Titicaca. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales. Bolivia. 29 p.
- Mollinedo, S. (2012). *Caracterización socioeconómica del subsistema de producción de tarwi (Lupinus mutabilis Sweet) en dos comunidades de Puerto Mayor Carabuco provincia Camacho, la Paz*. (Tesis Ingeniería Agronómica), Universidad de San Andrés, La Pax, Bolivia. 103 p.
- Monsalve, S. G. (1999). *Hidrología en la Ingeniera*. México. Segunda edición Alfa Omega 879 p.

- Pengue, W. (2004). *Agua virtual, agronegocios Sojero y cuestiones económicas ambientales futuras*. GEPANA FADU UBA. Buenos Aires. Argentina. 43 p.
- Rasmusson, D. (1985). *Barley*. Wisconsin, US. Columbia editor. p. 522
- Rendón, E. (2015). *La huella hídrica como un indicador de sustentabilidad y su aplicación en el Perú*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. 47 p.
- Roche, M. Bourges, J. Cortes, J y Mattos, R. (1991). *Climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca in El lago Titicaca síntesis del conocimiento limnológico actual*. Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Développement en Cooperation, Instituto de Historia Social Boliviana. Bolivia. 589 p.
- Serruto, A. (1992). *Balanço Hídrico com Base Ecológica da Vertente do Lago Titicaca (Perú - Bolíva)*; Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,; Orientador: Kokei Uehara.
- Serruto, A. R. (2003). *Riegos y Drenajes. Curso de actualización para examen de suficiencia profesional*. Facultad de Ciencias Agrarias, UNA – Puno. Perú. 69 p.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (2016). *Boletín informativo del clima de la región Puno*, periodo 2015-2016. Puno, Perú.
- Sistema de Información de Abastecimiento y Precios (SISAP). (2018). *Informe de abastecimiento de productos en mercados*. <http://www.agroarequipa.gob.pe/index.php/agricol/precios-y-mercados>
- Suquilanda, M. (2005). *Quinua: manual para la producción orgánica*. FUNDAGRO, Quito, Ec. 46 p.
- Suquilanda, M. (2014). *Producción orgánica de cultivos andinos*. FAO, Ecuador.
- Tapia, M. (1990). *Cultivos andinos subexplotados y su aporte para la alimentación*. FAO, primera edición. pp 36 - 77.

- Tapia, M. Fries, A. M. Mazar, I. Rosell, C. (2007). *Guía de campo de los cultivos andinos*. FAO-Asociación Nacional de Productores Ecológicos del Perú. Lima, PE. 209 p.
- UNEP, (2011). *Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication*. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Valle, M. (2017). *Caracterización morfológica y fenología en variedades de Tropaeolum tuberosum (mashua) de interés medicinal*. (Tesis Ingeniería agronómica). Universidad Técnica de Ambato, Ecuador 120 p.
- Van Hofwegen, P. (2004). Virtual wáter trade. Synthesis E-Conference. *World wáter Council*. 4th Wolrd Water Forum.
- Vásquez, A. y Chang, L. (1992). *El Riego*. Tomo I. Lima. Perú. 160 p.
- Vásquez, R. (1968). *Rendimiento de ocho variedades de habas precoces en Huancayo*. (Tesis), Universidad del Centro del Perú, Facultad de Ciencias Agronómicas. 85 p.
- Velázquez, E. (2008). *El metabolismo hídrico y los flujos de agua virtual. Una aplicación al sector hortofrutícola de Andalucía*. Universidad Autónoma de Barcelona. España. 47 p.



**ANEXOS**

**Anexo 1.** Variables de cálculo utilizadas en el estudio

Tabla 9

*Variables de cálculo, notación y unidades utilizadas para determinar la huella hídrica de cultivos andinos*

<b>Notación</b>	<b>Variables</b>	<b>Unidad</b>
ET <sub>o</sub>	Evapotranspiración de referencia	mm/mes
K <sub>c</sub>	Coefficiente de cultivo	unidad
ET <sub>c</sub>	Evapotranspiración del cultivo	mm/mes
ST	Superficie de terreno	Has
RAC	Requerimientos de agua del cultivo	m <sup>3</sup> /kg
RC	Rendimiento del cultivo	kg/ha
V	Contenido en agua virtual	lt/kg
E <sub>j</sub>	Comercializaciones del producto j	tn
V <sub>j</sub>	Contenido en agua virtual del producto j	m <sup>3</sup> /kg
AV <sub>t</sub>	Agua virtual transferida en productos agrícolas	m <sup>3</sup>

**Anexo 2.** Estadísticas descriptivas agronómicas de nueve cultivos andinos de la región Puno

**Tabla 10**  
*Estadísticas agronómicas de cultivos andinos (5 años)*

Papa	1	2	3	4	5		
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E
Siembras (Ha.)	56,465.00	57,865.00	59,356.00	60,401.00	59,711.00	58,759.60	1582.76
Sup. Perdida (Ha.)	853.00	737.00	419.00	706.00		678.75	184.36
Cosechas (Ha.)	55,532.00	57,208.00	58,937.00	59,695.00	59,711.00	58,216.60	1813.99
Rendimiento (Kg./Ha.)	11,579.54	11,702.77	12,243.90	11,588.66	12,441.99	11,911.37	403.08
Produccion (T.)	643,035.18	669,492.00	721,618.80	691,784.86	742,923.75	693,770.92	39871.77
Precio Chacra(S/Kg.)	1.18	1.37	1.33	1.54	1.52	1.39	0.15
<b>Oca</b>							
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E
Siembras (Ha.)	3,863.00	3,799.00	3,774.00	3,939.00	3,424.00	3,759.80	198.28
Sup. Perdida (Ha.)							
Cosechas (Ha.)	3,863.00	3,799.00	3,774.00	3,939.00	3,424.00	3,759.80	198.28
Rendimiento (Kg./Ha.)	8,242.40	8,307.52	8,548.33	7,851.10	8,267.94	8,243.46	250.80
Produccion (T.)	31,840.38	31,560.25	32,261.41	30,925.48	28,309.43	30,979.39	1569.55
Precio Chacra(S/Kg.)	1.17	1.17	1.23	1.23	1.29	1.22	0.05
<b>Olluco</b>							
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E
Siembras (Ha.)	2,176.00	2,337.00	2,574.00	2,762.00	3,042.00	2,578.20	342.36
Sup. Perdida (Ha.)		16.00				16.00	
Cosechas (Ha.)	2,176.00	2,321.00	2,574.00	2,762.00	3,042.00	2,575.00	345.24
Rendimiento (Kg./Ha.)	6,817.46	6,775.31	6,747.86	6,292.58	6,502.93	6,627.23	223.67
Produccion (T.)	14,834.79	15,725.50	17,369.00	17,380.11	19,781.90	17,018.26	1892.78
Precio Chacra(S/Kg.)	1.34	1.35	1.45	1.52	1.55	1.44	0.10
<b>Haba</b>							
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E
Siembras (Ha.)							
Sup. Perdida (Ha.)	493.00	438.00	451.00	480.00	532.00	478.80	36.98
Cosechas (Ha.)	493.00	438.00	451.00	480.00	532.00	478.80	36.98
Rendimiento (Kg./Ha.)	5,675.46	5,595.89	6,011.31	5,385.42	5,801.13	5,693.84	233.11
Produccion (T.)	2,798.00	2,451.00	2,711.10	2,585.00	3,086.20	2,726.26	240.13
Precio Chacra(S/Kg.)	0.96	0.97	0.96	1.16	1.44	1.09	0.21
<b>Tarwi</b>							
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E
Siembras (Ha.)	1,404.00	1,359.00	1,345.00	1,359.00	1,070.00	1,307.40	134.56
Sup. Perdida (Ha.)							
Cosechas (Ha.)	1,404.00	1,359.00	1,345.00	1,359.00	1,070.00	1,307.40	134.56
Rendimiento (Kg./Ha.)	1,245.51	1,239.51	1,324.73	1,278.44	1,350.47	1,287.73	48.73
Produccion (T.)	1,748.70	1,684.50	1,781.76	1,737.40	1,445.00	1,679.47	135.66
Precio Chacra(S/Kg.)	2.82	3.03	4.20	4.24	3.38	3.53	0.66
<b>Quinoa</b>							
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E



Siembras (Ha.)	31,258.00	32,929.00	34,640.00	36,430.00	35,309.00	34,113.20	2038.97
Sup. Perdida (Ha.)	1,372.00	668.00	473.00	736.00	40.00		
Cosechas (Ha.)	29,886.00	32,261.00	34,167.00	35,694.00	35,269.00	33,455.40	2396.56
Rendimiento (Kg./Ha.)	981.44	1,120.79	1,118.65	985.21	1,123.08	1,065.83	75.35
Produccion (T.)	29,331.30	36,157.69	38,220.86	35,166.00	39,609.75	35,697.12	3959.03
Precio Chacra(S/Kg.)	6.18	9.58	5.59	4.07	3.57	5.80	2.37
<b>Kañiwa</b>							
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E
Siembras (Ha.)	5,737.00	5,748.00	5,608.00	5,523.00	5,704.00	5,664.00	96.18
Sup. Perdida (Ha.)	143.00	18.00				80.50	88.39
Cosechas (Ha.)	5,594.00	5,730.00	5,608.00	5,523.00	5,704.00	5,631.80	84.69
Rendimiento (Kg./Ha.)	766.53	779.51	795.68	776.74	838.92	791.48	28.51
Produccion (T.)	4,287.96	4,466.60	4,462.20	4,289.91	4,785.22	4,458.38	202.69
Precio Chacra(S/Kg.)	3.95	4.89	5.22	4.12	4.07	4.45	0.57
<b>Cebada</b>							
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E
Siembras (Ha.)	26,650.00	27,165.00	27,091.00	27,750.00	25,625.00	26,856.20	791.79
Sup. Perdida (Ha.)	146.00	340.00	15.00	170.00		167.75	133.52
Cosechas (Ha.)	26,504.00	26,825.00	27,076.00	27,580.00	25,625.00	26,722.00	728.53
Rendimiento (Kg./Ha.)	1,017.13	1,116.41	1,129.06	1,035.60	1,059.75	1,071.59	49.28
Produccion (T.)	26,958.00	29,947.60	30,570.34	28,561.75	27,155.97	28,638.73	1618.15
Precio Chacra(S/Kg.)	1.35	1.33	1.32	1.30	1.34	1.33	0.02
<b>Mashua</b>							
Variable	2012/2013	2013/2014	2014/2015	2015/2016	2016/2017	Promedio	D.E
Siembras (Ha.)	859.00	892.00	914.00	952.00	968.00	917.00	44.23
Sup. Perdida (Ha.)							
Cosechas (Ha.)	859.00	892.00	914.00	952.00	968.00	917.00	44.23
Rendimiento (Kg./Ha.)	7,445.70	7,531.85	7,623.69	7,174.11	7,611.39	7,477.35	183.92
Produccion (T.)	6,395.86	6,718.41	6,968.05	6,829.75	7,367.83	6,855.98	355.62
Precio Chacra(S/Kg.)	1.13	1.10	1.16	1.12	1.23	1.15	0.05

Fuente: (DRA Puno, 2018)

Anexo 3. Cálculos de evapotranspiración para la región Puno

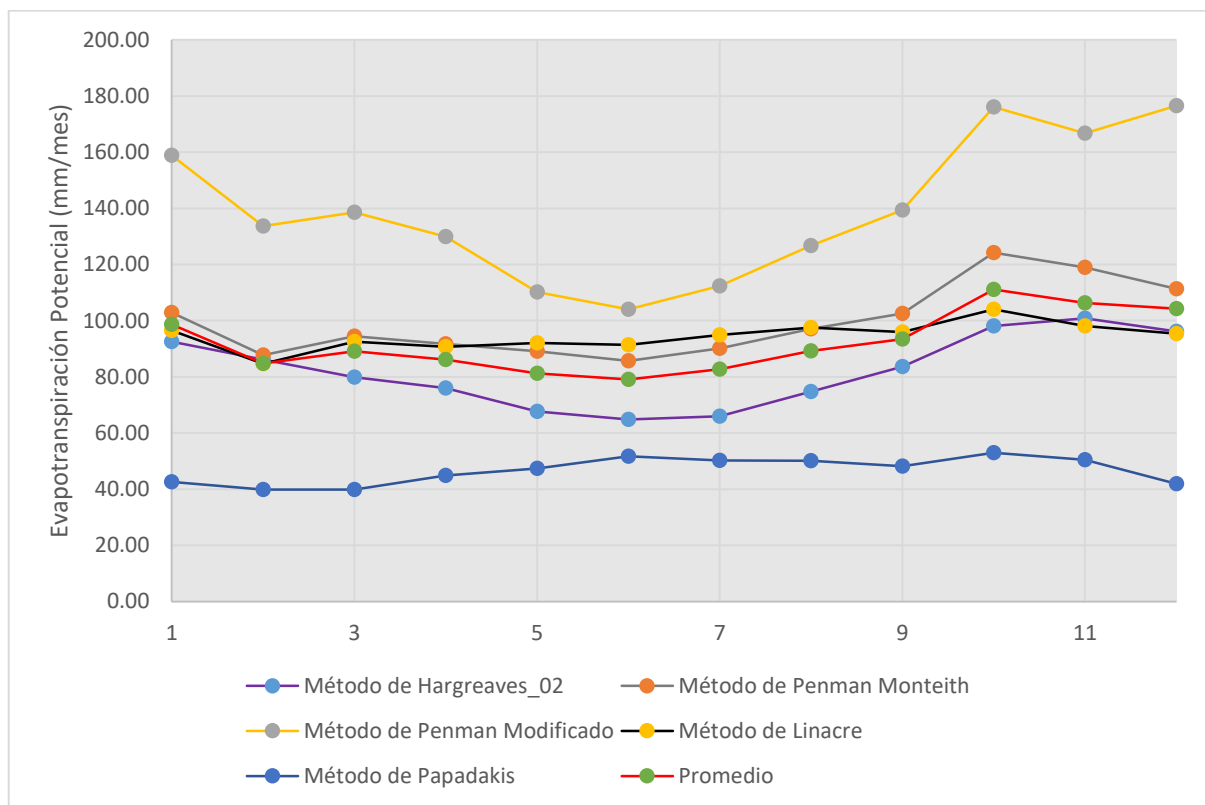


Figura 12. Calculo de evapotranspiración para la región de Puno realizado por cinco métodos.

Anexo 4. Valores de temperatura y precipitación pluvial

AÑOS	Meses	Temp Min	Temp max	Humedad	Viento	PREC. OBSERVADA
		°C	°C	%	m/s	
1987	Enero	4.8	15.8	64	1.3	173.7
	Febrero	4.9	14.9	63	1.4	113.5
	Marzo	4.2	15.6	63	1.4	130.3
	Abril	0.8	16.3	54	1.3	52.7
	Mayo	-2.1	16.3	51	1.4	7.1
	Junio	-4.4	15.1	45	1.5	6.2
	Julio	-6.1	14.7	43	1.8	0.0
	Agosto	-3.2	16.3	47	1.3	7.4
	Setiembre	-2.5	18.2	56	1.1	14.5
	Octubre	1.4	16.3	63	1.1	57.1
	Noviembre	-0.6	19.8	50	1.5	9.9
	Diciembre	2.8	16.3	65	1.7	114.2
1988	Enero	5.2	14.5	77	0.9	249.7
	Febrero	5.5	14.5	76	1.1	188.3
	Marzo	4.7	14.7	76	0.9	114.6
	Abril	2.0	15.6	68	1.1	29.5
	Mayo	-1.7	15.3	64	1.8	10.6
	Junio	-4.1	14.9	60	1.4	2.9
	Julio	-5.2	15.0	58	1.4	2.2
	Agosto	-4.1	15.7	58	2.0	8.1
	Setiembre	-0.5	17.8	59	2.1	4.0
	Octubre	1.1	18.2	58	2.0	57.5
	Noviembre	2.0	19.4	54	2.0	46.1
	Diciembre	2.9	17.6	61	1.6	73.7
1989	Enero	3.7	17.3	68	1.4	121.8
	Febrero	5.8	15.5	77	1.2	76.5
	Marzo	4.7	15.7	76	1.2	139.4
	Abril	3.1	15.4	75	1.2	67.6
	Mayo	-0.5	15.7	67	1.4	21.7
	Junio	-3.2	15.5	61	1.2	4.0
	Julio	-3.7	13.4	61	2.6	18.7
	Agosto	-3.3	15.5	59	2.4	9.1
	Setiembre	-0.5	17.0	55	1.8	16.4
	Octubre	2.9	17.1	65	2.0	83.3
	Noviembre	3.0	18.3	61	2.0	92.6
	Diciembre	4.2	17.1	67	1.4	177.4
1990	Enero	5.0	16.1	75	1.2	203.3
	Febrero	5.4	16.3	75	1.8	136.2
	Marzo	4.6	15.2	77	1.8	139.1
	Abril	1.3	16.1	70	1.4	18.3
	Mayo	-2.3	15.8	63	1.5	5.2
	Junio	-6.5	15.1	56	1.2	3.2
	Julio	-5.8	15.8	55	2.2	0.0
	Agosto	-5.0	15.9	53	2.0	1.5
	Setiembre	-2.7	16.3	54	1.8	30.9
	Octubre	-1.7	17.5	55	2.0	9.1
	Noviembre	-0.6	18.9	56	2.4	23.7
	Diciembre	2.9	18.7	62	1.7	132.1
1991	Enero	4.7	15.0	80	2.0	266.6
	Febrero	3.6	15.5	73	1.6	144.1
	Marzo	2.9	16.6	70	1.6	101.0
	Abril	1.4	16.6	69	2.6	38.9
	Mayo	-5.4	16.3	53	1.8	9.3
	Junio	-6.1	14.2	92	2.0	2.0
	Julio	-5.9	14.7	57	1.8	2.3
	Agosto	-3.1	14.5	60	2.9	19.2
	Setiembre	-1.8	16.1	58	1.9	26.5
	Octubre	-0.4	18.1	50	2.7	21.6
	Noviembre	0.9	19.0	52	2.8	16.8
	Diciembre	4.0	18.7	58	2.5	100.0
1992	Enero	4.8	15.8	64	1.3	173.7
	Febrero	4.9	14.9	63	1.4	113.5
	Marzo	4.2	15.6	63	1.4	130.3
	Abril	0.8	16.3	54	1.3	52.7
	Mayo	-2.1	16.3	51	1.4	7.1

	Junio	-4.4	15.1	45	1.5	6.2
	Julio	-6.1	14.7	43	1.8	0.0
	Agosto	-3.2	16.3	47	1.3	7.4
	Setiembre	-2.5	18.2	56	1.1	14.5
	Octubre	1.4	16.3	63	1.1	57.1
	Noviembre	-0.6	19.8	50	1.5	9.9
	Diciembre	2.8	16.3	65	1.7	114.2
1993	Enero	5.2	14.5	77	0.9	249.7
	Febrero	5.5	14.5	76	1.1	188.3
	Marzo	4.7	14.7	76	0.9	114.6
	Abril	2.0	15.6	68	1.1	29.5
	Mayo	-1.7	15.3	64	1.8	10.6
	Junio	-4.1	14.9	60	1.4	2.9
	Julio	-5.2	15.0	58	1.4	2.2
	Agosto	-4.1	15.7	58	2.0	8.1
	Setiembre	-0.5	17.8	59	2.1	4.0
	Octubre	1.1	18.2	58	2.0	57.5
	Noviembre	2.0	19.4	54	2.0	46.1
	Diciembre	2.9	17.6	61	1.6	73.7
1994	Enero	3.7	17.3	68	1.4	121.8
	Febrero	5.8	15.5	77	1.2	76.5
	Marzo	4.7	15.7	76	1.2	139.4
	Abril	3.1	15.4	75	1.2	67.6
	Mayo	-0.5	15.7	67	1.4	21.7
	Junio	-3.2	15.5	61	1.2	4.0
	Julio	-3.7	13.4	61	2.6	18.7
	Agosto	-3.3	15.5	59	2.4	9.1
	Setiembre	-0.5	17.0	55	1.8	16.4
	Octubre	2.9	17.1	65	2.0	83.3
	Noviembre	3.0	18.3	61	2.0	92.6
	Diciembre	4.2	17.1	67	1.4	177.4
1995	Enero	5.0	16.1	75	1.2	203.3
	Febrero	5.4	16.3	75	1.8	136.2
	Marzo	4.6	15.2	77	1.8	139.1
	Abril	1.3	16.1	70	1.4	18.3
	Mayo	-2.3	15.8	63	1.5	5.2
	Junio	-6.5	15.1	56	1.2	3.2
	Julio	-5.8	15.8	55	2.2	0.0
	Agosto	-5.0	15.9	53	2.0	1.5
	Setiembre	-2.7	16.3	54	1.8	30.9
	Octubre	-1.7	17.5	55	2.0	9.1
	Noviembre	-0.6	18.9	56	2.4	23.7
	Diciembre	2.9	18.7	62	1.7	132.1
1996	Enero	4.7	15.0	80	2.0	266.6
	Febrero	3.6	15.5	73	1.6	144.1
	Marzo	2.9	16.6	70	1.6	101.0
	Abril	1.4	16.6	69	2.6	38.9
	Mayo	-5.4	16.3	53	1.8	9.3
	Junio	-6.1	14.2	92	2.0	2.0
	Julio	-5.9	14.7	57	1.8	2.3
	Agosto	-3.1	14.5	60	2.9	19.2
	Setiembre	-1.8	16.1	58	1.9	26.5
	Octubre	-0.4	18.1	50	2.7	21.6
	Noviembre	0.9	19.0	52	2.8	16.8
	Diciembre	4.0	18.7	58	2.5	100.0
1997	Enero	4.8	15.8	64	1.3	173.7
	Febrero	4.9	14.9	63	1.4	113.5
	Marzo	4.2	15.6	63	1.4	130.3
	Abril	0.8	16.3	54	1.3	52.7
	Mayo	-2.1	16.3	51	1.4	7.1
	Junio	-4.4	15.1	45	1.5	6.2
	Julio	-6.1	14.7	43	1.8	0.0
	Agosto	-3.2	16.3	47	1.3	7.4
Setiembre	-2.5	18.2	56	1.1	14.5	

	Octubre	1.4	16.3	63	1.1	57.1
	Noviembre	-0.6	19.8	50	1.5	9.9
	Diciembre	2.8	16.3	65	1.7	114.2
1998	Enero	5.2	14.5	77	0.9	249.7
	Febrero	5.5	14.5	76	1.1	188.3
	Marzo	4.7	14.7	76	0.9	114.6
	Abril	2.0	15.6	68	1.1	29.5
	Mayo	-1.7	15.3	64	1.8	10.6
	Junio	-4.1	14.9	60	1.4	2.9
	Julio	-5.2	15.0	58	1.4	2.2
	Agosto	-4.1	15.7	58	2.0	8.1
	Setiembre	-0.5	17.8	59	2.1	4.0
	Octubre	1.1	18.2	58	2.0	57.5
	Noviembre	2.0	19.4	54	2.0	46.1
	Diciembre	2.9	17.6	61	1.6	73.7
1999	Enero	3.7	17.3	68	1.4	121.8
	Febrero	5.8	15.5	77	1.2	76.5
	Marzo	4.7	15.7	76	1.2	139.4
	Abril	3.1	15.4	75	1.2	67.6
	Mayo	-0.5	15.7	67	1.4	21.7
	Junio	-3.2	15.5	61	1.2	4.0
	Julio	-3.7	13.4	61	2.6	18.7
	Agosto	-3.3	15.5	59	2.4	9.1
	Setiembre	-0.5	17.0	55	1.8	16.4
	Octubre	2.9	17.1	65	2.0	83.3
	Noviembre	3.0	18.3	61	2.0	92.6
	Diciembre	4.2	17.1	67	1.4	177.4
2000	Enero	5.0	16.1	75	1.2	203.3
	Febrero	5.4	16.3	75	1.8	136.2
	Marzo	4.6	15.2	77	1.8	139.1
	Abril	1.3	16.1	70	1.4	18.3
	Mayo	-2.3	15.8	63	1.5	5.2
	Junio	-6.5	15.1	56	1.2	3.2
	Julio	-5.8	15.8	55	2.2	0.0
	Agosto	-5.0	15.9	53	2.0	1.5
	Setiembre	-2.7	16.3	54	1.8	30.9
	Octubre	-1.7	17.5	55	2.0	9.1
	Noviembre	-0.6	18.9	56	2.4	23.7
	Diciembre	2.9	18.7	62	1.7	132.1
2001	Enero	4.7	15.0	80	2.0	266.6
	Febrero	3.6	15.5	73	1.6	144.1
	Marzo	2.9	16.6	70	1.6	101.0
	Abril	1.4	16.6	69	2.6	38.9
	Mayo	-5.4	16.3	53	1.8	9.3
	Junio	-6.1	14.2	92	2.0	2.0
	Julio	-5.9	14.7	57	1.8	2.3
	Agosto	-3.1	14.5	60	2.9	19.2
	Setiembre	-1.8	16.1	58	1.9	26.5
	Octubre	-0.4	18.1	50	2.7	21.6
	Noviembre	0.9	19.0	52	2.8	16.8
	Diciembre	4.0	18.7	58	2.5	100.0
2002	Enero	4.8	15.8	64	1.3	173.7
	Febrero	4.9	14.9	63	1.4	113.5
	Marzo	4.2	15.6	63	1.4	130.3
	Abril	0.8	16.3	54	1.3	52.7
	Mayo	-2.1	16.3	51	1.4	7.1
	Junio	-4.4	15.1	45	1.5	6.2
	Julio	-6.1	14.7	43	1.8	0.0
	Agosto	-3.2	16.3	47	1.3	7.4
	Setiembre	-2.5	18.2	56	1.1	14.5
	Octubre	1.4	16.3	63	1.1	57.1
	Noviembre	-0.6	19.8	50	1.5	9.9
	Diciembre	2.8	16.3	65	1.7	114.2
	Enero	5.2	14.5	77	0.9	249.7

2003	Febrero	5.5	14.5	76	1.1	188.3
	Marzo	4.7	14.7	76	0.9	114.6
	Abril	2.0	15.6	68	1.1	29.5
	Mayo	-1.7	15.3	64	1.8	10.6
	Junio	-4.1	14.9	60	1.4	2.9
	Julio	-5.2	15.0	58	1.4	2.2
	Agosto	-4.1	15.7	58	2.0	8.1
	Setiembre	-0.5	17.8	59	2.1	4.0
	Octubre	1.1	18.2	58	2.0	57.5
	Noviembre	2.0	19.4	54	2.0	46.1
	Diciembre	2.9	17.6	61	1.6	73.7
	2004	Enero	3.7	17.3	68	1.4
Febrero		5.8	15.5	77	1.2	76.5
Marzo		4.7	15.7	76	1.2	139.4
Abril		3.1	15.4	75	1.2	67.6
Mayo		-0.5	15.7	67	1.4	21.7
Junio		-3.2	15.5	61	1.2	4.0
Julio		-3.7	13.4	61	2.6	18.7
Agosto		-3.3	15.5	59	2.4	9.1
Setiembre		-0.5	17.0	55	1.8	16.4
Octubre		2.9	17.1	65	2.0	83.3
Noviembre		3.0	18.3	61	2.0	92.6
Diciembre		4.2	17.1	67	1.4	177.4
2005	Enero	5.0	16.1	75	1.2	203.3
	Febrero	5.4	16.3	75	1.8	136.2
	Marzo	4.6	15.2	77	1.8	139.1
	Abril	1.3	16.1	70	1.4	18.3
	Mayo	-2.3	15.8	63	1.5	5.2
	Junio	-6.5	15.1	56	1.2	3.2
	Julio	-5.8	15.8	55	2.2	0.0
	Agosto	-5.0	15.9	53	2.0	1.5
	Setiembre	-2.7	16.3	54	1.8	30.9
	Octubre	-1.7	17.5	55	2.0	9.1
	Noviembre	-0.6	18.9	56	2.4	23.7
	Diciembre	2.9	18.7	62	1.7	132.1
2006	Enero	4.7	15.0	80	2.0	266.6
	Febrero	3.6	15.5	73	1.6	144.1
	Marzo	2.9	16.6	70	1.6	101.0
	Abril	1.4	16.6	69	2.6	38.9
	Mayo	-5.4	16.3	53	1.8	9.3
	Junio	-6.1	14.2	92	2.0	2.0
	Julio	-5.9	14.7	57	1.8	2.3
	Agosto	-3.1	14.5	60	2.9	19.2
	Setiembre	-1.8	16.1	58	1.9	26.5
	Octubre	-0.4	18.1	50	2.7	21.6
	Noviembre	0.9	19.0	52	2.8	16.8
	Diciembre	4.0	18.7	58	2.5	100.0
2007	Enero	4.8	15.8	64	1.3	173.7
	Febrero	4.9	14.9	63	1.4	113.5
	Marzo	4.2	15.6	63	1.4	130.3
	Abril	0.8	16.3	54	1.3	52.7
	Mayo	-2.1	16.3	51	1.4	7.1
	Junio	-4.4	15.1	45	1.5	6.2
	Julio	-6.1	14.7	43	1.8	0.0
	Agosto	-3.2	16.3	47	1.3	7.4
	Setiembre	-2.5	18.2	56	1.1	14.5
	Octubre	1.4	16.3	63	1.1	57.1
	Noviembre	-0.6	19.8	50	1.5	9.9
	Diciembre	2.8	16.3	65	1.7	114.2
2008	Enero	5.2	14.5	77	0.9	249.7
	Febrero	5.5	14.5	76	1.1	188.3
	Marzo	4.7	14.7	76	0.9	114.6
	Abril	2.0	15.6	68	1.1	29.5
	Mayo	-1.7	15.3	64	1.8	10.6

	Junio	-4.1	14.9	60	1.4	2.9
	Julio	-5.2	15.0	58	1.4	2.2
	Agosto	-4.1	15.7	58	2.0	8.1
	Setiembre	-0.5	17.8	59	2.1	4.0
	Octubre	1.1	18.2	58	2.0	57.5
	Noviembre	2.0	19.4	54	2.0	46.1
	Diciembre	2.9	17.6	61	1.6	73.7
2009	Enero	3.7	17.3	68	1.4	121.8
	Febrero	5.8	15.5	77	1.2	76.5
	Marzo	4.7	15.7	76	1.2	139.4
	Abril	3.1	15.4	75	1.2	67.6
	Mayo	-0.5	15.7	67	1.4	21.7
	Junio	-3.2	15.5	61	1.2	4.0
	Julio	-3.7	13.4	61	2.6	18.7
	Agosto	-3.3	15.5	59	2.4	9.1
	Setiembre	-0.5	17.0	55	1.8	16.4
	Octubre	2.9	17.1	65	2.0	83.3
	Noviembre	3.0	18.3	61	2.0	92.6
	Diciembre	4.2	17.1	67	1.4	177.4
2010	Enero	5.0	16.1	75	1.2	203.3
	Febrero	5.4	16.3	75	1.8	136.2
	Marzo	4.6	15.2	77	1.8	139.1
	Abril	1.3	16.1	70	1.4	18.3
	Mayo	-2.3	15.8	63	1.5	5.2
	Junio	-6.5	15.1	56	1.2	3.2
	Julio	-5.8	15.8	55	2.2	0.0
	Agosto	-5.0	15.9	53	2.0	1.5
	Setiembre	-2.7	16.3	54	1.8	30.9
	Octubre	-1.7	17.5	55	2.0	9.1
	Noviembre	-0.6	18.9	56	2.4	23.7
	Diciembre	2.9	18.7	62	1.7	132.1
2011	Enero	4.7	15.0	80	2.0	266.6
	Febrero	3.6	15.5	73	1.6	144.1
	Marzo	2.9	16.6	70	1.6	101.0
	Abril	1.4	16.6	69	2.6	38.9
	Mayo	-5.4	16.3	53	1.8	9.3
	Junio	-6.1	14.2	92	2.0	2.0
	Julio	-5.9	14.7	57	1.8	2.3
	Agosto	-3.1	14.5	60	2.9	19.2
	Setiembre	-1.8	16.1	58	1.9	26.5
	Octubre	-0.4	18.1	50	2.7	21.6
	Noviembre	0.9	19.0	52	2.8	16.8
	Diciembre	4.0	18.7	58	2.5	100.0
2013	Enero	4.8	15.8	64	1.3	173.7
	Febrero	4.9	14.9	63	1.4	113.5
	Marzo	4.2	15.6	63	1.4	130.3
	Abril	0.8	16.3	54	1.3	52.7
	Mayo	-2.1	16.3	51	1.4	7.1
	Junio	-4.4	15.1	45	1.5	6.2
	Julio	-6.1	14.7	43	1.8	0.0
	Agosto	-3.2	16.3	47	1.3	7.4
	Setiembre	-2.5	18.2	56	1.1	14.5
	Octubre	1.4	16.3	63	1.1	57.1
	Noviembre	-0.6	19.8	50	1.5	9.9
	Diciembre	2.8	16.3	65	1.7	114.2
2014	Enero	5.2	14.5	77	0.9	249.7
	Febrero	5.5	14.5	76	1.1	188.3
	Marzo	4.7	14.7	76	0.9	114.6
	Abril	2.0	15.6	68	1.1	29.5
	Mayo	-1.7	15.3	64	1.8	10.6
	Junio	-4.1	14.9	60	1.4	2.9
	Julio	-5.2	15.0	58	1.4	2.2
	Agosto	-4.1	15.7	58	2.0	8.1
Setiembre	-0.5	17.8	59	2.1	4.0	

	Octubre	1.1	18.2	58	2.0	57.5
	Noviembre	2.0	19.4	54	2.0	46.1
	Diciembre	2.9	17.6	61	1.6	73.7
2015	Enero	3.7	17.3	68	1.4	121.8
	Febrero	5.8	15.5	77	1.2	76.5
	Marzo	4.7	15.7	76	1.2	139.4
	Abril	3.1	15.4	75	1.2	67.6
	Mayo	-0.5	15.7	67	1.4	21.7
	Junio	-3.2	15.5	61	1.2	4.0
	Julio	-3.7	13.4	61	2.6	18.7
	Agosto	-3.3	15.5	59	2.4	9.1
	Setiembre	-0.5	17.0	55	1.8	16.4
	Octubre	2.9	17.1	65	2.0	83.3
	Noviembre	3.0	18.3	61	2.0	92.6
	Diciembre	4.2	17.1	67	1.4	177.4
2016	Enero	5.0	16.1	75	1.2	203.3
	Febrero	5.4	16.3	75	1.8	136.2
	Marzo	4.6	15.2	77	1.8	139.1
	Abril	1.3	16.1	70	1.4	18.3
	Mayo	-2.3	15.8	63	1.5	5.2
	Junio	-6.5	15.1	56	1.2	3.2
	Julio	-5.8	15.8	55	2.2	0.0
	Agosto	-5.0	15.9	53	2.0	1.5
	Setiembre	-2.7	16.3	54	1.8	30.9
	Octubre	-1.7	17.5	55	2.0	9.1
	Noviembre	-0.6	18.9	56	2.4	23.7
	Diciembre	2.9	18.7	62	1.7	132.1
2017	Enero	4.7	15.0	80	2.0	266.6
	Febrero	3.6	15.5	73	1.6	144.1
	Marzo	2.9	16.6	70	1.6	101.0
	Abril	1.4	16.6	69	2.6	38.9
	Mayo	-5.4	16.3	53	1.8	9.3
	Junio	-6.1	14.2	92	2.0	2.0
	Julio	-5.9	14.7	57	1.8	2.3
	Agosto	-3.1	14.5	60	2.9	19.2
	Setiembre	-1.8	16.1	58	1.9	26.5
	Octubre	-0.4	18.1	50	2.7	21.6
	Noviembre	0.9	19.0	52	2.8	16.8
	Diciembre	4.0	18.7	58	2.5	100.0

Estación meteorológica CP-Puno.



Anexo 5. Evidencias fotográficas



Figura 13. Acopio de kañihua en la feria dominical de Ilave.



Figura 14. Acopio de quinua y cebada en la feria dominical de Ilave.



*Figura 15.* Acopio de papa y olluco en la feria dominical de Ilave.



*Figura 16.* Acopio de oca y mashua en la feria dominical de Ilave



*Figura 17.* Acopio de tarwi y haba en la feria dominical de Ilave.



*Figura 18.* Acopio de tarwi y haba en la feria dominical de Ilave.

**Anexo 6.** Cartas solicitando información a la DRA PUNO y AREQUIPA

"Año del Diálogo y la Reconciliación Nacional"

Puno, 18 de octubre 2018

**CARTA N° 001-2018-JLVT.**

Señor:  
**MVZ. RUDY NIÑO DE GUZMÁN HINOJOSA**  
 Director Regional Agrario-Puno.

GOBIERNO REGIONAL PUNO  
 DIRECCIÓN REGIONAL AGRARIA PUNO  
 TRÁMITE DOCUMENTARIO

18 OCT 2018

Región N° **5095**

Firma: *[Firma]*

**Presente.-**

**Asunto:** Solicita información y datos para desarrollar el proyecto de tesis "HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS ANDINOS DE LA REGIÓN PUNO COMERCIALIZADOS EN LA REGIÓN AREQUIPA – 2018".

---

Por medio del presente, me dirijo a Usted con la finalidad de solicitar mediante su despacho información para desarrollar el proyecto de tesis "HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS ANDINOS DE LA REGIÓN PUNO COMERCIALIZADOS EN LA REGIÓN AREQUIPA – 2018", para el cual se requiere la siguiente información:

- Producción 2016, 2017 y 2018 de los siguientes cultivos.

Cultivo	Nombre científico
Papa	<i>Solanum andigenum</i>
Oca	<i>Oxalis tuberosa</i>
Olluco	<i>Ullucus tuberosus</i>
Haba**	<i>Vicia faba</i>
Tarwi	<i>Lupinus mutabilis</i>
Quinua	<i>Chenopodium quinoa</i>
Kañiwa	<i>Chenopodium pallidicaule</i>
Cebada**	<i>Hordeum vulgare</i>
Mashua	<i>Tropaeolum tuberosum</i>

- Estadística de los cultivos en la región Puno

Los objetivos de la investigación son:

- Formular un modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.
- Determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.
- Estimar el volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos.
- Estimar el valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.

"Año del Diálogo y la Reconciliación Nacional"

La justificación es que, actualmente se desconoce la cantidad de agua que se intercambia mediante los cultivos andinos de la región Puno hacia Arequipa, cuyo conocimiento lo consideramos importante para tomarlo en cuenta en futuras propuestas sobre la gestión de los recursos hídricos en la zona sur del Perú, por lo que la presente propuesta investigativa presenta interés, ya que permitirá conocer inicialmente la huella hídrica de los principales cultivos andinos de la región Puno mediante un modelo conceptual apropiado, posteriormente se estimará el agua virtual que se traslada en dichos productos así como su cuantificación económica, resultados que finalmente permitirán una mejor gestión del agua en la región sur del Perú, identificando cultivos de bajo consumo de agua y promoviendo el intercambio de otros productos de mayor consumo del mismo.

Para recabar la información me apersonaré al despacho o dirección donde se derive el documento para informar y solicitar la información pertinente.

Una vez concluida la investigación se entregará un ejemplar de archivo digital y físico para la DRA Puno.

Sin otro particular quedo de usted,

Atentamente,


A.V. LAYKAKOTA N° 298-4  
998806819

C.c Archivo.

**RETORNAR CARGO  
SELLADO y FIRMADO**  
Remito N° 130020 Folios 02

"Año del Diálogo y la Reconciliación Nacional"

Puno, 26 de octubre 2018

**CARTA N° 001-2018-JLVT.**

**Señor:**  
**JUAN FRANCISCO ALMEYDA CUPE**  
**GERENTE REGIONAL DE AGRICULTURA**  
**Saco Oliveros 402 – Cerro Jull, José Luis Bustamante y Rivero**

**Arequipa.-**

**Asunto:** Solicita información y datos para desarrollar el proyecto de tesis "HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS ANDINOS DE LA REGIÓN PUNO COMERCIALIZADOS EN LA REGIÓN AREQUIPA – 2018".

Por medio del presente, me dirijo a Usted con la finalidad de solicitar mediante su despacho información para desarrollar el proyecto de tesis "HUELLA HÍDRICA DE CULTIVOS ANDINOS DE LA REGIÓN PUNO COMERCIALIZADOS EN LA REGIÓN AREQUIPA – 2018", para el cual se requiere la siguiente información:

- Datos de la comercialización de 2016, 2017 y 2018 de los siguientes cultivos.

Cultivo	Nombre científico
Papa	<i>Solanum andigenum</i>
Oca	<i>Oxalis tuberosa</i>
Olluco	<i>Lillicus tuberosis</i>
Haba**	<i>Vicia faba</i>
Tarwi	<i>Lupinus mutabilis</i>
Quinua	<i>Chenopodium quinoa</i>
Kañiwa	<i>Chenopodium pallidicaule</i>
Cebada**	<i>Hordeum vulgare</i>
Mashua	<i>Tropaeolum tuberosum</i>

*of*

GOBIERNO REGIONAL DE AREQUIPA  
GERENCIA REGIONAL DE AGRICULTURA  
TRÁMITE DOCUMENTAL  
**29 OCT. 2018**  
DOC..... EXP.....  
FOLIO 2 HORA 0:10 PM

- Estadísticas de la comercialización en la ciudad de Arequipa de los cultivos producidos en la región Puno.

Los objetivos de la investigación son:

- Formular un modelo conceptual para determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.
- Determinar la huella hídrica de los cultivos andinos de la región Puno.
- Estimar el volumen de agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa mediante los cultivos andinos.

"Año del Diálogo y la Reconciliación Nacional"

- Estimar el valor económico del agua virtual procedente de la región Puno que ingresa a la región Arequipa en los cultivos andinos.

La justificación es que, actualmente se desconoce la cantidad de agua que se intercambia mediante los cultivos andinos de la región Puno hacia Arequipa, cuyo conocimiento lo consideramos importante para tomarlo en cuenta en futuras propuestas sobre la gestión de los recursos hídricos en la zona sur del Perú, por lo que la presente propuesta investigativa presenta interés, ya que permitirá conocer inicialmente la huella hídrica de los principales cultivos andinos de la región Puno mediante un modelo conceptual apropiado, posteriormente se estimará el agua virtual que se traslada en dichos productos así como su cuantificación económica, resultados que finalmente permitirán una mejor gestión del agua en la región sur del Perú, identificando cultivos de bajo consumo de agua y promoviendo el intercambio de otros productos de mayor consumo del mismo.

Para recabar la información me apersonaré al despacho o dirección donde se derive el documento para informar y solicitar la información pertinente.

Adjunto al presente acta de aprobación del proyecto de investigación.

Sin otro particular quedo de usted,

Atentamente,



JOSÉ LUIS VILCA TICONA  
BIÓLOGO  
C.B.P. N.º 4535

C.c Archivo.

Coordinación celular 998806819

**Anexo 7.** Valores de temperatura y precipitación pluvial utilizados en climadiagramas

Prom 3 años	15-jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	15-jun
T °C	5.04	6.07	7.66	8.98	9.64	9.78	9.57	9.5	9.4	8.72	6.92	5.33
pp (mm)	5.3	12.9	22.3	38	51.6	93.7	181.6	143.5	129.7	43.4	10.4	5.6
Prom 30 años	15-jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	15-jun
T °C	4.9	5.8	7.66	8.6	9.54	10.02	10.05	8.9	9.2	8.04	6.5	5.3
pp (mm)	5.02	11.5	22.7	35	49.6	91.4	174	136	125	41.4	8.7	5.2

**Anexo 8.** Características edáficas promedio de suelos de la región Puno

GRUPO	Area Ha	% Area	CLASE	Area Ha	% Area	SUB CLASE	Area Ha.	% Area				
A	414685.0924	5.48	A2	146503.8174	1.94	A2s	1568.5786	0.02				
						A2s(a)	2537.6477	0.03				
						A2sc	129872.3399	1.72				
						A2si	12525.2512	0.17				
			A3		268181.2750	3.55	A3	268181.2750	3.55	A3s	11366.3527	0.15
										A3sc	106448.6471	1.41
										A3sc(a)	19494.6145	0.26
										A3sec	8696.8855	0.11
										A3si	13730.0782	0.18
										A3sw	108444.6970	1.43

**Nota:** Se utilizó Tierras Aptas para Cultivos en Limpio (A)

**Fuente:** Gobierno Regional de Puno, 2014

Reúne a las tierras que presentan características climáticas, de relieve y edáficas para la producción de cultivos en limpio que demandan remociones o araduras periódicas y continuadas del suelo. Estas tierras, debido a sus características ecológicas, también pueden destinarse a otras alternativas de uso, ya sea cultivos permanentes, pastos, producción forestal y protección, en concordancia a las políticas e interés social del Estado, y privado, sin contravenir los principios del uso sostenible.



Anexo 9. Procedimientos de cálculo en el software CROPWAT V. 8.0

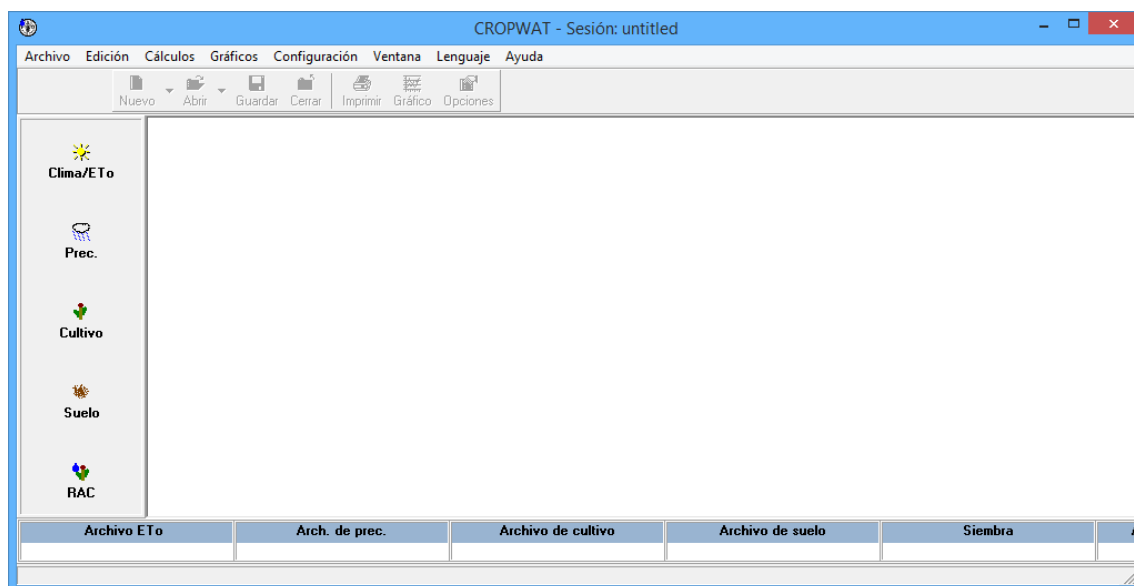


Figura 19. Ventana de inicio del software Cropwat

Mes	Temp Min °C	Temp Max °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m²/día	ETo mm/día
Enero	17.0	31.3	47	104	8.8	18.7	3.99
Febrero	19.3	34.3	37	112	9.3	21.2	4.91
Marzo	22.5	37.5	30	121	9.7	23.5	5.93
Abril	26.0	39.3	34	138	9.2	23.6	6.66
Mayo	27.2	40.0	37	225	8.3	22.2	7.93
Junio	25.0	35.6	54	354	5.8	18.3	7.19
Julio	23.8	32.5	64	363	4.4	16.2	5.74
Agosto	23.5	32.1	63	302	4.9	16.9	5.47
Septiembre	23.3	31.9	65	207	5.5	17.3	4.83
Octubre	22.4	32.4	61	95	8.7	20.7	4.58
Noviembre	19.2	31.0	56	78	7.7	17.6	3.73

Figura 20. Cálculo de la evapotranspiración

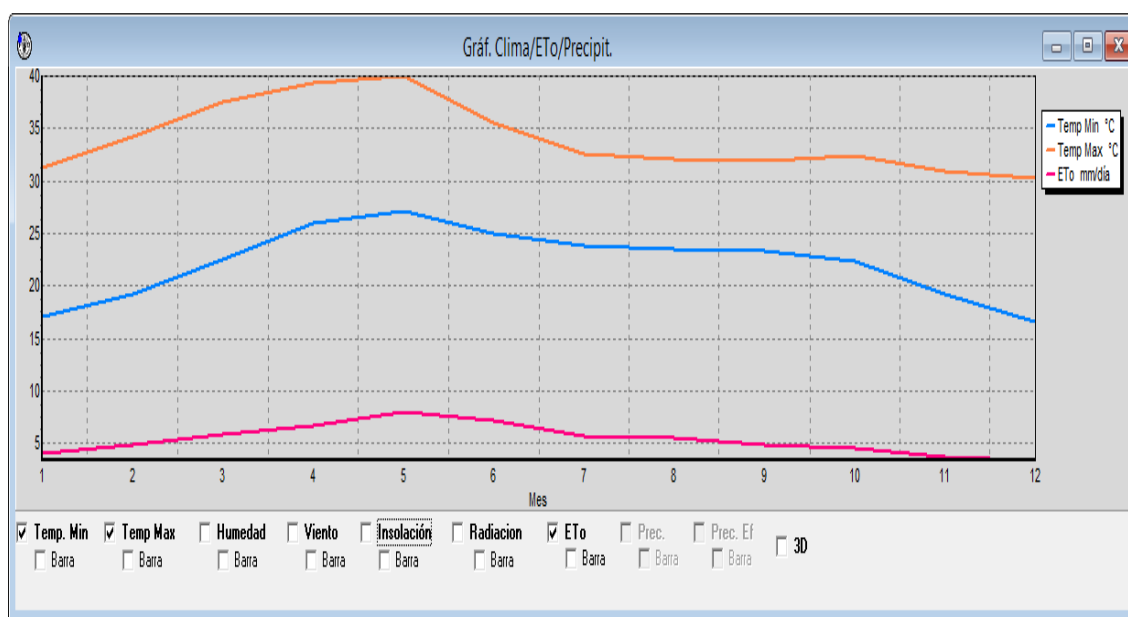


Figura 21. Resultados de evapotranspiración

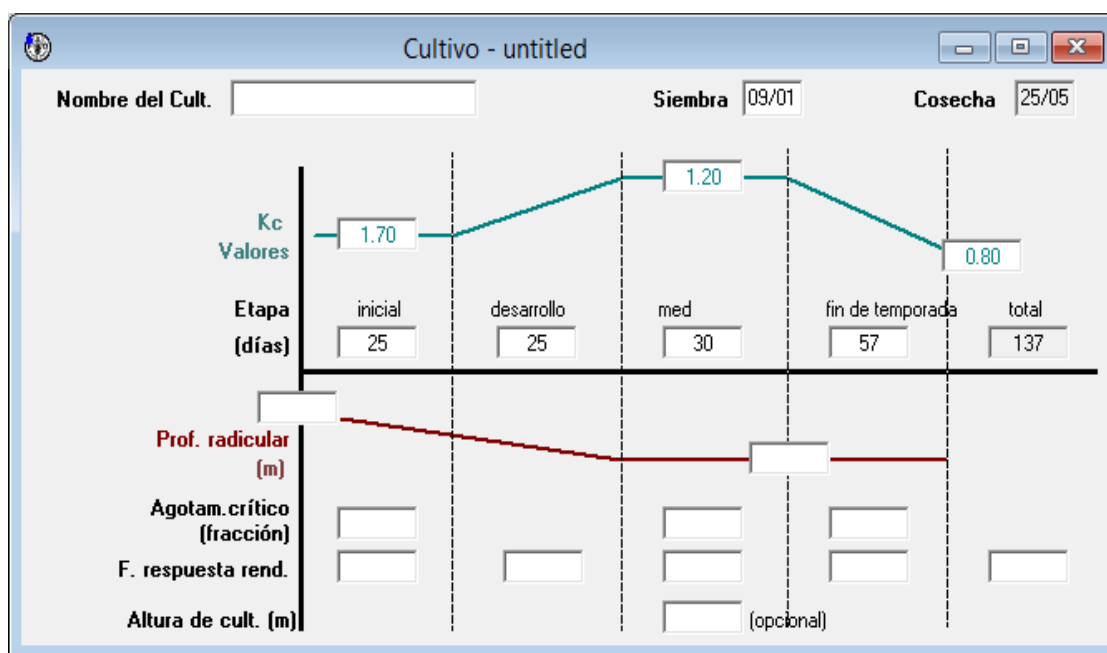
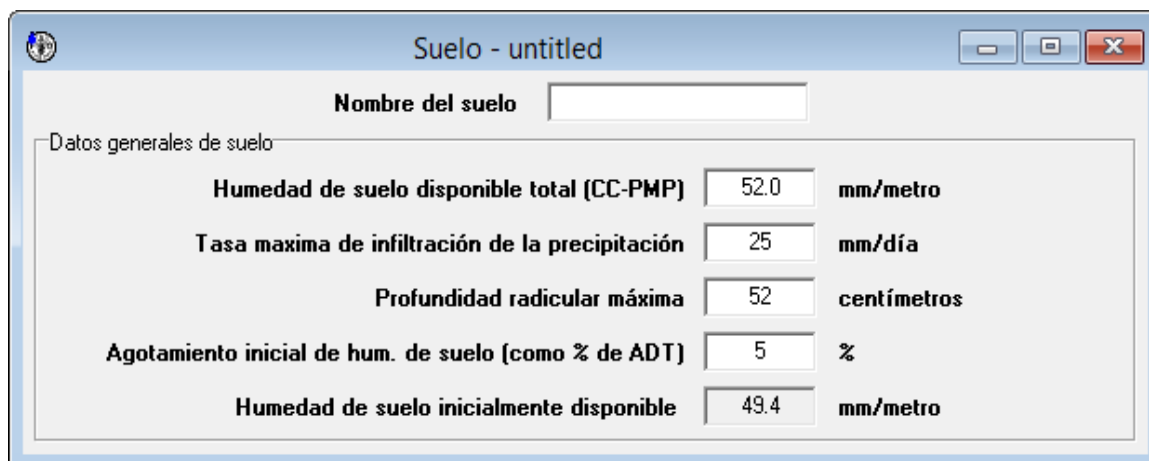


Figura 22. Cálculos para el cultivo en software Cropwat



Datos generales de suelo		
Nombre del suelo	<input type="text"/>	
Humedad de suelo disponible total (CC-PMP)	52.0	mm/metro
Tasa maxima de infiltración de la precipitación	25	mm/día
Profundidad radicular máxima	52	centímetros
Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT)	5	%
Humedad de suelo inicialmente disponible	49.4	mm/metro

Figura 23. Cálculos para el tipo de suelo en software Cropwat