

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Facultad de Ciencias Agronómicas**  
**Escuela de Pregrado**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN DE  
LECHUGAS “BABY” BAJO SISTEMA HIDROPÓNICO**

**WATER FOOTPRINT ESTIMATION OF "BABY" LETTUCE PRODUCTION  
UNDER HYDROPONIC SYSTEM**

**LESLIE NICOLE CARO ROMERO**

Santiago - Chile  
2014

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Facultad de Ciencias Agronómicas**  
**Escuela de Pregrado**

**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA DE LA PRODUCCIÓN DE  
LECHUGAS “BABY” BAJO SISTEMA HIDROPÓNICO**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniera Agrónoma

LESLIE NICOLE CARO ROMERO

PROFESOR GUÍA	Calificaciones
Sr. Rodrigo Fuster G. Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Dr.	6,5
PROFESORES EVALUADORES	
Sr. Pablo Morales P. Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Ph.D.	6,5
Sra. Erika Kania K. Ingeniera Agrónoma, Dra.	6,3

Santiago - Chile  
2014

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco en primer lugar a quienes me ayudaron en la realización de este trabajo. A mi profesor guía, Rodrigo Fuster, por su buena voluntad en acoger mi propuesta y su constante apoyo y paciencia durante la elaboración de la memoria. Al Centro de Estudios de Postcosecha y su equipo de trabajo, por facilitarme el espacio para montar el ensayo y por apoyarme y orientarme en la producción. Al Laboratorio de Química de Suelos y Aguas y su equipo de trabajo, muy especialmente a la profesora Yasna Tapia, por su invaluable ayuda y orientación en las mediciones, también por su cariño, paciencia y disciplina que a veces me faltaba. A Juan Manuel Uribe, por aparecer siempre en los momentos indicados y darme la confianza y empuje que necesité en los momentos más complicados. Gracias infinitas.

Agradezco también a quienes me acompañaron en mi vida universitaria, a Andresito, Feña y Luchín, mis inseparables. A Diego por su compañía. A Catalina, Romi, Bruno, Fabián, Anita, Paulis y todo el clan basura, por tantas risas compartidas. Sin duda, lo mejor que pude vivir en la U fue conocerlos a ustedes.

A mi familia, por su amor y formación, y por sobretodo a la razón de mis esfuerzos y mi perseverancia, y a quien dedico todos mis logros: mi mamá.

## INDICE

RESUMEN.....	5
“ABSTRACT” .....	6
INTRODUCCIÓN .....	7
Objetivos .....	10
MATERIALES Y MÉTODOS .....	11
Ubicación del ensayo .....	11
Materiales .....	11
Manual de la WFN .....	11
Material vegetal .....	11
Sistema de cultivo hidropónico NFT .....	12
Huella hídrica ( $WF_{prod}$ ).....	12
Huella azul ( $WF_{azul}$ ).....	15
Huella verde ( $WF_{verde}$ ).....	16
Huella gris ( $WF_{gris}$ ).....	17
Análisis químicos .....	18
Análisis estadístico.....	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	20
Establecimiento y desarrollo del cultivo .....	20
Consumo de Solución Nutritiva. ....	22
Rendimiento.....	23
Análisis químico de solución nutritiva.....	25
pH .....	25
Conductividad Eléctrica .....	26
Cationes disueltos.....	27
Relación de Adsorción de Sodio .....	27
Sodio Porcentual.....	28
Aniones disueltos.....	29
Cloruro y sulfato.....	29
Macronutrientes .....	29
Micronutrientes.....	30
HUELLA HÍDRICA .....	32
Huella Azul .....	32
Huella Gris .....	32
Huella Hídrica Total.....	34
Análisis estadístico.....	37
CONCLUSIONES .....	39
BIBLIOGRAFÍA .....	41
ANEXOS .....	44
Anexo I. Temperatura .....	44
Anexo II. Análisis de agua campus Antumapu .....	46
APÉNDICES.....	47
Apéndice I. Monitoreo diario sistemas NFT .....	47

NFT N° 6 .....	47
NFT N° 7 .....	48
NFT N° 8 .....	49
Apéndice II. Huella gris norma NCh1333.....	51
Apéndice III. Huella gris norma NCh409/1 .....	52

### Lista de cuadros

Cuadro 1. Composición de la solución nutritiva.....	23
Cuadro 2. Peso fresco por planta y producción total estimada para cada mesa de cultivo..	24
Cuadro 3. pH de la solución nutritiva .....	26
Cuadro 4. CE de la solución nutritiva .....	26
Cuadro 5. Clasificación del agua para riego según CE.....	27
Cuadro 6. Contenido de cationes en solución nutritiva.....	27
Cuadro 7. RAS de solución nutritiva .....	28
Cuadro 8. Na% de la solución nutritiva .....	29
Cuadro 9. Contenido de aniones Cl <sup>-</sup> y SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> en la solución nutritiva. ....	29
Cuadro 10. Contenido de macronutrientes N, P y K en solución nutritiva.....	30
Cuadro 11. Contenido de micronutrientes Cu, Mn, Zn y Fe en solución nutritiva.....	31
Cuadro 12. Estimación de la huella azul.....	32
Cuadro 13. Estimación de la huella gris.....	33
Cuadro 14. Estimación de la huella hídrica .....	35
Cuadro 15: Parámetros estadísticos HH total.....	37

### Lista de figuras

Figura 1: Lechuga tipo lollo bionda.....	11
Figura 2: Sistema cultivo hidopónico NFT.....	12
Figura 3. Orientación de las mesas de cultivo NFT en el invernadero .....	20
Figura 4. Vista frontal del invernadero al día 1. ....	21
Figura 5. Vista lateral del invernadero al día 1. ....	21
Figura 6. Plantas al día n° 20 .....	22
Figura 7. Consumo de solución nutritiva de cada mesa de cultivo.....	23
Figura 8. Tamaño de la planta cosechada .....	24
Figura 9. Temperatura media, mínima y máxima diaria para periodo productivo. ....	25
Figura 10: Contribución de huellas azul, verde y gris en cultivos de lechuga.....	36
Figura 11: Huella hídrica de cada mesa de cultivo hidropónico.....	38

**Lista de ecuaciones**

Ecuación 1. Huella hídrica mediante enfoque “Chain-summation” .....	13
Ecuación 2. Huella hídrica mediante enfoque “Step-wise accumulative” .....	13
Ecuación 3. Componentes huella azul .....	15
Ecuación 4. Cálculo huella azul .....	15
Ecuación 5. Uso de agua del cultivo .....	16
Ecuación 6: Cálculo huella azul, propuesta metodológica.....	16
Ecuación 7. Cálculo huella gris.....	17
Ecuación 8. Cálculo huella gris, propuesta metodológica .....	18
Ecuación 9. Media aritmética poblacional .....	19
Ecuación 10: Desviación estándar poblacional.....	19
Ecuación 11: Coeficiente de variación $C_v$ .....	19
Ecuación 12. Relación de Adsorción de Sodio .....	27
Ecuación 13. Sodio porcentual.....	28

## RESUMEN

La presente memoria de título aplica una estimación de Huella Hídrica (WF por sus siglas en inglés) a la producción de lechuga hidropónica tamaño “baby” bajo invernadero. La huella hídrica mide la cantidad de agua consumida en un proceso productivo a lo largo de su cadena de suministros, cuyo valor se divide en tres componentes: huella azul, que mide el consumo de agua superficial y subterránea; huella verde, que mide el consumo de agua proveniente de las precipitaciones; y huella gris, definida como el volumen de agua dulce requerido para asimilar la carga de contaminantes a un cierto estándar de calidad.

El estudio considera la huella hídrica desde el trasplante de plantines de lechuga al sistema de cultivo hidropónico hasta la cosecha de las plantas tamaño “baby”. Se realiza una propuesta metodológica al protocolo dispuesto en el “Manual de evaluación de la Huella Hídrica” de la Water Footprint Network (WFN), a fin de adaptarlo a las condiciones del cultivo.

El valor de la huella hídrica obtenida es aproximadamente de  $19 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ . El componente más relevante de este valor es la huella azul, que supera el 90 % del valor total de la huella hídrica. El porcentaje restante corresponde a la huella gris. No se utilizó agua proveniente de precipitaciones, por lo cual la huella verde es cero.

Al realizar esta investigación se encontraron ciertas limitaciones para la aplicación del indicador huella hídrica, relacionadas a la falta de normativas sobre la calidad de los cuerpos de agua en Chile. Se espera que a futuro, con la reciente aprobación de la norma ISO 14046 sobre huella hídrica, se continúe con la aplicación de este indicador en distintos rubros productivos y llegue a constituir una herramienta útil para mejorar la gestión de los recursos hídricos.

**PALABRAS CLAVE:** Agua Virtual, Huella Hídrica, Cultivo Hidropónico, *Lactuca sativa* L.



**“ABSTRACT”**

This paper applies an estimate of water footprint (WF) to the hydroponic lettuce production "baby" size under greenhouse. The water footprint measures the amount of water consumed in a productive throughout their supply chain process whose value is divided into three components: blue footprint, measuring the consumption of surface and groundwater; green footprint, which measures the consumption of water from rainfall; and gray footprint, defined as the volume of freshwater required to assimilate the load of pollutants to a certain standard of quality.

The study considers the water footprint from transplanting of seedlings of lettuce hydroponic system to harvest plant "baby" size. A methodological approach to the protocol provided in the "The water footprint assessment manual" of the Water Footprint Network (WFN), in order to adapt to the culture conditions is performed.

The value obtained water footprint is approximately  $19 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ . The most important part of this value is the blue footprint, which exceeds 90 % of the total value of the water footprint. The remaining percentage corresponds to the gray footprint. No water from rainfall was used, so the green footprint is zero.

In conducting this research are limitations to the application of the water footprint indicator related to the lack of regulations on the quality of water bodies in Chile were found. It is expected that in the future, with the recent adoption of the ISO 14046 standard on water footprint, will continue with the implementation of this indicator in different productive sectors and come to be a useful tool for improving the management of water resources.

**KEY WORDS:** Virtual Water, Water Footprint, Hydroponic crop, *Lactuca sativa* L.

## INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un recurso renovable pero finito. La disponibilidad y calidad del agua dulce varían enormemente en el tiempo y espacio. El crecimiento de la población junto con el continuo desarrollo socioeconómico ejercen presión sobre los escasos recursos hídricos del planeta. Los casos notificados de agotamiento de las aguas subterráneas y el empeoramiento de los niveles de contaminación constituyen un indicador de la creciente escasez de agua. Diversos autores señalan que las alteraciones climáticas repercutirán fuertemente sobre el ciclo hidrológico, principalmente en la precipitación, la evapotranspiración y la humedad del suelo, entre otros. (Gleick, 1993; Postel, 2000; Goyal, 2004; WWAP, 2009)

En este contexto, a mediados de los años 90 se formula el concepto de Agua Virtual (AV). En 1989, G. Fishelson señala que países con problemas de escasez hídrica debieran especializarse en elaborar y exportar productos con bajos requerimientos de agua, y a su vez, disminuir la producción de aquellos con mayor demanda hídrica. Estos últimos, recomienda, debieran ser importados desde países con menor costo de agua. Años más tarde, el geógrafo J.A. Allan acuña el término Agua Virtual, el cual define en su trabajo "Virtual Water: a strategic resource. Global solutions to regional deficits" (1998) como "la cantidad de agua consumida en el proceso de elaboración de un producto". Con ello, se concientiza el hecho de que la elaboración de cada producto va asociado a un consumo que ha de considerarse al planificar la producción. Hoekstra (2003) propone dos usos para este concepto. En primer lugar, la considera una herramienta para asegurar la disponibilidad de agua mediante el ahorro y la eficiencia en su uso; y en segundo lugar, señala que puede ayudar a estimar el vínculo entre patrones de consumo e impacto ambiental.

A nivel mundial, los principales sectores consumidores y contaminantes de agua son los industriales. Hoekstra *et al.*, (2011) señalan a la agricultura como la principal responsable de estos consumos, mientras que la contaminación estaría más asociada a los componentes industriales. Se estima que el 86% de la huella hídrica de la humanidad está radicada en el sector agrícola (Shiklomanov, 2000; Hoekstra y Chapagain, 2008).

La sequía es un fenómeno cada vez más recurrente en Chile y ante ello se requiere alcanzar mayores niveles de eficiencia en la producción agrícola (Villavicencio *et al.*, 2011). En un contexto de escasez, agravado por la sequía, la gestión de los recursos hídricos adquiere cada vez mayor importancia, haciendo además necesario intensificar investigaciones que compatibilicen productividad y sustentabilidad.

Respondiendo a estas exigencias, la producción de hortalizas utiliza una técnica moderna: el cultivo hidropónico o sin suelo. Según señala Bermejillo *et al.*, (2006), esta técnica optimiza el aprovechamiento del agua a la vez que disminuye su impacto ambiental, obteniendo un producto seguro y saludable. La nutrición de las plantas se consigue mediante soluciones nutritivas especialmente formuladas, las que deben contener todos los

macro y micronutrientes requeridos por el cultivo. Tras su uso, la solución puede resultar con alteraciones de pH y CE, además de contener restos de nutrientes, alterando la calidad del agua que sale del sistema.

Para disminuir el impacto ambiental de la solución nutritiva, es necesario que su formulación esté lo más ajustada posible a los requerimientos del cultivo, de manera que contenga el mínimo de nutrientes sobrantes.

En el cultivo hidropónico de hortalizas se utilizan con frecuencia dos sistemas: raíz flotante y NFT (“Nutrient Film Technique”, por sus siglas en inglés). Según señalan Sádaba *et al.* (2008), en el sistema de raíz flotante la hortaliza crece directamente sobre el agua, con la solución nutritiva disuelta en ella y en ausencia de cualquier tipo de sustrato. En el sistema NFT, en cambio, las plantas crecen también sobre agua pero, como su nombre indica, sobre una lámina de agua en continuo movimiento, enriquecida con la solución nutritiva.

Carrasco e Izquierdo (1996) mencionan que la ventaja del sistema “NFT” es la alta calidad obtenida de diferentes productos hortícolas, en un corto período de cultivo como también de rendimiento. Además, no existen pérdidas o salidas al exterior, por lo que se constituye un sistema de tipo cerrado. Por lo tanto, el sistema ofrece mayor eficiencia en cuanto a la utilización de los elementos minerales esenciales para el crecimiento de las plantas, de agua y oxígeno.

En los últimos años se ha evidenciado en los consumidores la tendencia a exigir productos no sólo de calidad, sino también ambientalmente amigables o de bajo impacto. Para ello es necesario contar con indicadores que reflejen el impacto de la producción sobre los recursos naturales del planeta. Hoekstra y Hung (2002) introdujeron el concepto de huella hídrica al generar un indicador de consumo directo e indirecto de agua dulce, incorporando la cuantificación de su contaminación. La huella hídrica de un producto se define como “el volumen total de agua dulce que se utiliza para producirlo, a lo largo de la cadena de suministros” (Hoekstra *et al.*, 2011).

Tradicionalmente, las estadísticas sobre el uso de agua se centran en medir las captaciones de agua y el uso de agua directa asociada a la evapotranspiración del cultivo. El método de estimación de la huella hídrica considera una perspectiva mucho más amplia, midiendo tanto el uso de agua directa como la indirecta, donde la segunda se refiere al uso de agua en la cadena de suministro de un producto (Hoekstra y Chapagain, 2008).

Hoekstra *et al.* (2011) señalan en su “Manual de evaluación de la huella hídrica” que la metodología de estimación considera el agua bajo tres usos: uso del agua subterránea y superficial (huella hídrica azul), uso de agua de lluvia (huella hídrica verde) y la contaminación del agua (huella hídrica gris).

La Organización Internacional de Normalización (ISO) aprobó recientemente (2014) la primera norma internacional sobre la Huella del Agua, ISO 14046, que establece los

principios, requerimientos y directrices para la evaluación del indicador (ISO, 2014). Esta norma complementa la familia de normas mundiales ISO 14000 de gestión ambiental.

A nivel nacional, Fundación Chile es la primera organización chilena en adherirse a la fundación Water Footprint Network (WFN) en calidad de “sponsoring partner” (socio patrocinador). Entre algunas de las iniciativas en que han trabajado destacan el Sistema Nacional de Certificación de Huella del Agua, proyecto que ha desarrollado un Estándar de Gestión Sostenible del Agua, cuya finalidad es constituir una herramienta de competitividad para sector agroexportador en mercados internacionales. A su vez, ha cooperado con el proyecto SuizAgua Andina, iniciativa que trabaja con el sector privado de Chile, Colombia y Perú para medir y reducir su huella hídrica, ejecutando actividades de Responsabilidad Social Empresarial Agua (RSE Agua). El objetivo de esta herramienta es la reducción de huella hídrica, mitigación y compensación para un uso sustentable del recurso, utilizando como instrumento normativo la norma ISO 14046. A nivel municipal, Fundación Chile y la Municipalidad de Vitacura trabajan en la campaña “Conoce tu huella hídrica”, iniciativa que incluye la medición de la huella hídrica del Parque Bicentenario y el Centro Cívico, además de la inclusión de personajes públicos que también medirán su huella hídrica personal (Fundación Chile, 2012).

Durante el año 2012, el Programa de Huella Hídrica de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal de la UC realizó una primera estimación de la huella hídrica en el sector agrícola chileno. Esta investigación se enmarca en el estudio “Seguridad Hídrica y Alimentaria de Latinoamérica” convocado por el Observatorio del Agua de la Fundación Botín, España, en el cual participaron Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, México y España. El estudio incluyó 19 especies, entre ellas forrajeras, cereales, frutales y tubérculos. Como resultado, se obtuvo que la huella hídrica per cápita del sector agrícola nacional equivale a 572,8 m<sup>3</sup>/hab/año, muy por debajo del promedio a nivel mundial, que alcanza los 907 m<sup>3</sup>/hab/año (Donoso y Franco, 2013).

A pesar de las múltiples iniciativas en estimación de huella hídrica para productos agroalimentarios, no se ha abarcado aún el área de producción hidropónica bajo invernadero.

La lechuga (*Lactuca sativa* L) es una de las 18 especies de hortalizas más producidas a nivel nacional, siendo la principal hortaliza de hoja, seguida del repollo (*Brassica oleracea* var. *capitata*), la espinaca (*Spinacia oleracea* L.) y la acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*) (ODEPA, 2013). Las hortalizas tipo “baby”, caracterizadas por su pequeño tamaño y alta precocidad, son cada vez más valoradas en alta gastronomía y platos ornamentales de ensaladas (Encalada, 2000).

Mekonnen y Hoekstra (2011) estimaron la huella hídrica de 126 cultivos y sus derivados. En él, estimaron la huella hídrica total de la producción de lechuga, cultivada en suelo, en 237 m<sup>3</sup> por tonelada. Sin embargo, actualmente no existe investigación relacionada a la producción de lechugas tipo “baby” bajo invernadero en un sistema hidropónico, de manera

que esta investigación generará información nueva en un área aún poco explorada, con las correspondientes adaptaciones metodológicas a la WFN.

## **Objetivos**

### Objetivo general

Estimar la huella hídrica de la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) tamaño “baby” en invernadero bajo sistema hidropónico NFT.

### Objetivos específicos

- Proponer una adaptación a la metodología de la Water Footprint Network para la estimación de la huella hídrica de un cultivo hidropónico en invernadero.
- Estimar bajo esta adaptación la huella hídrica total de la producción de lechuga (*Lactuca sativa* L.) tamaño “baby” en invernadero bajo sistema hidropónico NFT.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del ensayo

El ensayo se llevó a cabo en el invernadero del Centro de Estudios de Postcosecha CEPOC del Departamento de Producción Agrícola y en el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas del Departamento de Ingeniería y Suelos, pertenecientes a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Campus Antumapu.

### Materiales

#### Manual de la WFN

Se utilizó el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica de la Water Footprint Network (WFN) cuyas metodologías propuestas por Hoekstra *et al.* (2011) sirvieron de guía para la estimación de la huella hídrica del cultivo.

#### Material vegetal

Como material vegetal se utilizaron 1575 plantines de lechugas variedad Levistro (Rijk Zwaan), adquiridas al vivero “Los Olmos”. Esta variedad corresponde a una lechuga tipo lollo bionda o crespa rubia (Figura 1).



Figura 1: Lechuga tipo lollo bionda.

### Sistema de cultivo hidropónico NFT

El ensayo fue montado en base a tres repeticiones: NFT 6, NFT 7 y NFT 8. Cada uno consiste en una mesa de cultivo hidropónico NFT de 7 x 1.5 m con 8 perfiles cada una, de los cuales 7 se mantuvieron activos y uno inactivo. En cada perfil se dispusieron 75 plantas separadas a 9 cm, obteniéndose 525 plantas por mesa. Cada mesa opera con un estanque de agua independiente, el cual contiene la solución nutritiva que circula en un sistema cerrado (Figura 2), cuya formulación es la misma para las tres mesas. Para la sujeción de las plantas a los perfiles del sistema se utilizó espuma de poliuretano de alta densidad, de 2 pulgadas de espesor.

Las plantas fueron cosechadas cuando su peso fresco bordeaba los 50 gramos.

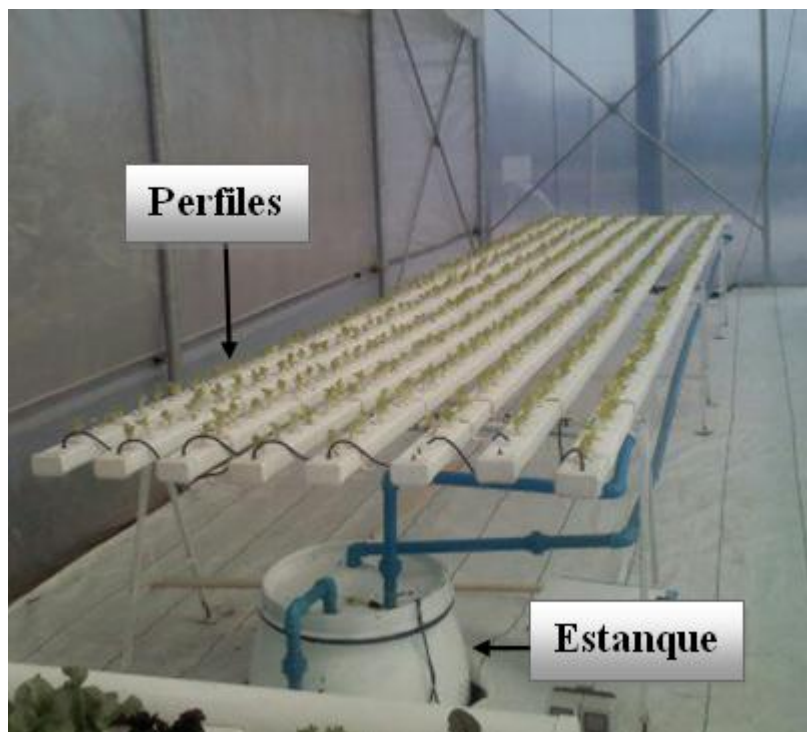


Figura 2: Sistema cultivo hidropónico NFT

### Huella hídrica ( $WF_{prod}$ )

Para la estimación de la huella hídrica (WF, por sus siglas en inglés) se deben definir los límites del sistema productivo a estudiar, especificando la etapa en que se comienza con la contabilidad hasta la etapa en donde termina. Posteriormente, se debe definir una metodología para el cálculo, para lo cual existen dos enfoques: el enfoque “chain-summation” y el enfoque “step-wise accumulative” (Hoekstra *et al.*, 2011).

i. “Chain-summation”

Es recomendado cuando se produce un solo producto y consiste en sumar todas las huellas de cada actividad del proceso productivo que involucren agua, y dividir las por la cantidad total del producto final (Ecuación 1).

$$WF_{prod}[p] = \frac{\sum_{s=1}^k WF_{proc}[S]}{P[p]} [Volumen/masa]$$

Ecuación 1. Huella hídrica mediante enfoque “Chain-summation”

$WF_{prod}[p]$  corresponde a la huella hídrica total,  $WF_{proc}[S]$  corresponde a la huella hídrica del proceso  $[S]$  y  $P[p]$  es la masa de producto obtenido.

ii. “Step-wise accumulative”

Consiste en calcular la huella hídrica de un producto basado en las huellas hídricas de los insumos de cada actividad de la producción más la huella del proceso completo (Ecuación 2).

$$WF_{prod}[p] = WF_{proc}[p] + \sum_{i=1}^y \frac{WF_{prod}[i]}{f_p[p, i]} [Volumen/masa]$$

Ecuación 2. Huella hídrica mediante enfoque “Step-wise accumulative”

Donde  $WF_{proc}[p]$  es la huella hídrica del proceso para transformar un insumo en otro producto (volumen/masa),  $WF_{prod}[i]$  corresponde a la huella hídrica del insumo  $[i]$  (volumen/masa) y  $f_p[p, i]$  es la cantidad de producto obtenido a partir de la cantidad de insumo (masa/masa)

Para el caso de este estudio, se utilizará el método “Chain-summation”, puesto que los insumos utilizados en la producción hidropónica, como fertilizantes y espuma, son de orígenes muy variados, por lo cual se requeriría realizar un estudio de huella hídrica para cada uno de ellos y eso escapa a los alcances de este trabajo.



En cualquiera de los métodos descritos anteriormente, la huella hídrica estimada es la suma de las huellas azul, verde y gris. En agricultura, las huellas azul y verde son estimadas mediante evapotranspiración (ET) o uso de agua del cultivo (CWU), mientras que la huella gris se calcula como el volumen de agua necesaria para diluir los contaminantes utilizados en el proceso hasta alcanzar el contenido natural. En este caso, se calculó la huella gris hasta alcanzar la calidad de agua para riego, cuyos parámetros están definidos en la Norma Chilena Oficial NCh1333.Of78 de calidad de agua para riego (en adelante norma NCh1333).

La huella hídrica es un indicador multidimensional, cuyos componentes pueden ser especificados a nivel espacial (global, nacional, regional, predial) y temporal (anual, mensual, diaria). De esta manera, la huella hídrica entrega información explícita a lo largo del tiempo y del espacio sobre la apropiación humana del agua, lo cual permite inferir acerca de sus impactos ambientales, sociales y económicos (Hoekstra *et al.*, 2011). Este estudio considera un periodo productivo de aproximadamente 45 días entre los meses de agosto y octubre, en un sistema productivo ubicado en la Región Metropolitana. Como propuesta metodológica, se estimó la producción en volumen de agua por tonelada de producto sin considerar el factor tiempo en cada una de las huellas calculadas, puesto que el sistema de cultivo hidropónico bajo invernadero puede realizarse durante todo el año, permitiendo ciclos sucesivos.

Según la metodología propuesta por Hoekstra *et al.* (2011), se deben considerar los consumos de agua cuya contribución a la huella hídrica fuera superior al 5%. Por ello, se trabajó bajo el supuesto de que el consumo indirecto, relacionado a los insumos como fertilizantes y espuma, aporta menos del 5% a la huella hídrica y se considera como despreciable. Asimismo, se trabajó bajo el supuesto de que el agua consumida para la producción de los plantines por parte del vivero aporta menos del 5% a la huella hídrica y también se puede eliminar de la contabilidad.

La huella hídrica total de un producto  $p$  (volumen/masa) es igual a la suma de las huellas del proceso dividido por la cantidad de producción del producto  $p$ . Para calcular la masa de producto obtenido se midió el peso fresco de las lechugas cosechadas en cada mesa de cultivo.

A continuación se presenta la metodología utilizada por la Water Footprint Network (WFN) para la estimación de las huellas azul, verde y gris. A su vez, se presenta una propuesta metodológica para la estimación de dichas huellas, adaptada a las condiciones de un cultivo hidropónico bajo invernadero.

### Huella azul ( $WF_{azul}$ )

Según Hoekstra *et al.* (2011), la  $WF_{azul}$  es un indicador de uso consuntivo de agua, es decir, agua dulce de superficie o subterránea. “Uso consuntivo del agua” se refiere a uno de los cuatro casos siguientes:

- El agua se evapora;
- El agua se incorpora a un producto;
- El agua no vuelve a la misma zona de flujo, por ejemplo, es devuelta a otra zona de captación o al mar;
- El agua no vuelve en el mismo período, por ejemplo, si se retira en un periodo seco y devuelve en un período de lluvias.

En el caso de las hortalizas de invernadero, existe uso consuntivo del agua de la solución nutritiva en el proceso de evapotranspiración de la planta y su incorporación a los tejidos. Tras su uso, el agua vuelve a la misma zona de flujo y en el mismo período. En este caso, el cálculo de la huella azul será el señalado en la Ecuación 3:

$$WF_{proc.azul} = \text{Evaporación Agua Azul} + \text{Incorporación Agua Azul} \text{ [Volumen / masa]}$$

Ecuación 3. Componentes huella azul

Hoekstra *et al.* (2011) señalan que la unidad de huella hídrica azul de un proceso es el volumen de agua por unidad de tiempo, por ejemplo, por día, mes o año. Cuando se divide por la cantidad de producto que se deriva del proceso, la huella hídrica de proceso también se puede expresar en términos de volumen de agua por unidad de producto (masa de producto en toneladas).

El componente azul de la huella hídrica del proceso de crecimiento de un cultivo ( $WF_{proc,azul}$ ,  $m^3 \cdot ton^{-1}$ ) se calcula como el componente azul en el uso de agua de los cultivos (Crop Water Use,  $CWU_{azul}$ ,  $m^3 \cdot há^{-1}$ ) dividido por el rendimiento del cultivo ( $Y$ ,  $ton \cdot há^{-1}$ ) (Ecuación 4).

$$WF_{proc.azul} = \frac{CWU_{azul}}{Y} \text{ [Volumen / masa]}$$

Ecuación 4. Cálculo huella azul

El manual señala que el componente azul en el uso de agua de los cultivos ( $CWU_{azul}$ ,  $m^3 \cdot há^{-1}$ ) se calcula teniendo en cuenta la acumulación de la evapotranspiración diaria ( $ET$ ,  $mm \cdot día^{-1}$ ) durante el período de crecimiento completo, según lo señalado en la Ecuación 5:

$$CWU_{azul} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ET_{azul} [\text{Volumen / masa}]$$

Ecuación 5. Uso de agua del cultivo

En el que  $ET_{azul}$  representa la evapotranspiración de agua azul. El factor 10 convierte la profundidad del agua medida en mm a volúmenes de agua de superficie en  $m^3 \cdot ha^{-1}$ . La suma se realiza sobre el  $lgp$  (largo del periodo productivo), período comprendido entre el día de la siembra (día 1) hasta el día de la cosecha ( $lgp$  es igual a la duración del período de crecimiento en días).

Para el caso de este estudio, se midió diariamente el consumo de solución nutritiva (ET) por cada estanque con una varilla graduada en litros. Por lo tanto, para la obtención del componente  $CWU_{azul}$  el factor utilizado es  $1000^{-1}$  en reemplazo de 10, el cual convierte el consumo de solución nutritiva medida en litros a volúmenes de agua en  $m^3$ , sin considerar el área, al tratarse de un cultivo hidropónico. Por consiguiente,  $CWU_{azul}$  se expresa sólo en términos de volumen ( $m^3$ ). La suma se realiza sobre el período comprendido entre el día de transplante (día 1) hasta el día de la cosecha (Ecuación 6).

$$CWU_{azul} = 1000^{-1} * \sum_{d=1}^{lgp} ET_{azul} [\text{Volumen}]$$

Ecuación 6: Cálculo huella azul, propuesta metodológica

### **Huella verde ( $WF_{verde}$ )**

La  $WF_{verde}$  corresponde al volumen de agua proveniente de las precipitaciones que cae sobre suelos y plantas y es consumida en forma de evapotranspiración. Para el caso de este estudio, por las condiciones de invernadero, no se hizo uso del agua de las precipitaciones, por lo tanto no se consideró.

### Huella gris ( $WF_{gris}$ )

La  $WF_{gris}$  de una fase del proceso es un indicador del grado de contaminación del agua dulce que se puede asociar con tal fase del proceso. Se define como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar la carga de contaminantes comparado con las concentraciones normales y las normas de calidad de agua. El concepto de huella hídrica gris ha crecido a partir del reconocimiento de que la medida de la contaminación del agua se puede expresar en términos del volumen de agua que se requiere para diluir los contaminantes de tal manera que se conviertan en inofensivos (Hoekstra *et al.*, 2011).

Como se señala en el Manual de evaluación de huella hídrica, la  $WF_{gris}$  (Ecuación 7) se calcula dividiendo la carga contaminante ( $L$ , en masa/tiempo) por la diferencia entre el estándar de calidad de agua de este contaminante ( $C_{max}$ , la concentración máxima aceptable, en masa/volumen) y su concentración natural en la recepción agua en el cuerpo ( $C_{nat}$ , en masa/volumen).

$$WF_{prod.gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} [\text{Volumen/tiempo}]$$

Ecuación 7. Cálculo huella gris

La concentración natural en un cuerpo de agua receptor es la concentración en el cuerpo de agua que se produciría si no hubiera perturbaciones humanas en la cuenca. Para las sustancias artificiales que naturalmente no se producen en el agua,  $C_{nat} = 0$ .

Los contaminantes generalmente consisten en fertilizantes (nitrógeno, fósforo, etc.), pesticidas e insecticidas. Se tiene que considerar sólo el “flujo de residuos a cuerpos de agua dulce, que generalmente es una fracción del total de la aplicación de fertilizantes o pesticidas para el campo. Hay que representar sólo el contaminante más crítico, que es el contaminante cuyo cálculo anterior obtiene el mayor volumen de agua” (Hoekstra *et al.*, 2011).

Para el caso de este estudio, se utilizó una metodología propuesta para el cálculo de la  $WF_{gris}$  (Ecuación 8). Experimentalmente, para obtener  $C_{max}$  se consideraron los parámetros presentes en el estándar de calidad de agua para riego de la norma NCh1333. Estos parámetros fueron comparados con los resultados arrojados en el análisis químico de la solución nutritiva  $C_{sol}$ . Tras obtener la diferencia, se calculó el volumen de agua necesario para diluir la solución nutritiva y llevar las concentraciones de  $C_{sol}$  a  $C_{max}$ , ambas expresadas en  $mg \cdot L^{-1}$ .  $V_{sol}$  representa el volumen de solución nutritiva necesario para obtener 1 ton de producto, expresado en  $m^3$ . Y corresponde al rendimiento del cultivo (ton). Se aplicó la siguiente ecuación:

$$WF_{gris} = \frac{\left(\frac{C_{sol}}{C_{max}} - 1\right) \times V_{sol}}{y} [Volumen/masa]$$

Ecuación 8. Cálculo huella gris, propuesta metodológica

### Análisis químicos

Tras la cosecha de las plantas, la solución nutritiva resultante de las mesas de cultivo hidropónico fue sometida a análisis químicos, con la finalidad de determinar la huella gris del producto. Para ello, se consideraron parámetros presentes en el estándar de calidad de agua para riego de la norma NCh1333. Los análisis considerados fueron los siguientes:

- pH
- Conductividad Eléctrica (CE)
- Cationes calcio ( $Ca^{+2}$ ), magnesio ( $Mg^{+2}$ ), sodio ( $Na^{+}$ ) y potasio ( $K^{+}$ )
- Relación de Absorción de Sodio (RAS)
- Sodio porcentual (Na%)
- Aniones cloruro ( $Cl^{-}$ ) y sulfato ( $SO_4^{-2}$ )
- Macronutrientes nitrógeno en forma de nitrato ( $NO_3^{-}$ ) y fósforo (P)
- Micronutrientes cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn) y hierro (Fe).

La metodología usada para las mediciones químicas está contenida en el manual “Métodos de análisis de agua para riego” de Sadzawka (2006), del Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA.

### Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se utilizó estadística descriptiva, cuya finalidad es presentar los datos para un posterior análisis de la información. El análisis estadístico se aplicó sobre la huella hídrica total calculada para cada mesa de cultivo NFT, comparando las tres mesas entre sí.

Como medida de tendencia central, se obtuvo la media aritmética poblacional  $\mu$  (Ecuación 9) del consumo de solución nutritiva total del periodo productivo y la huella gris para cada mesa de cultivo. En la ecuación, n es el número total de valores y  $x_i$  ( $x_2, x_1, \dots, x_n$ ) son los números individuales en el conjunto de datos.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)$$

Ecuación 9. Media aritmética poblacional

Se analizó la dispersión de los datos mediante la desviación estándar poblacional  $\sigma$  (Ecuación 10), la cual permite conocer cuánto tienden a alejarse los valores puntuales del promedio en la distribución. En la ecuación, N es el tamaño de la población y  $\mu$  es la media aritmética de la población.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

Ecuación 10: Desviación estándar poblacional

Para calificar la confiabilidad de los datos obtenidos, se utilizó el coeficiente de variación  $C_v$  (Ecuación 11). Este coeficiente se utiliza para relacionar la desviación estándar de una población con su media, y se expresa en términos porcentuales. Mientras mayor es el coeficiente de variación, mayor heterogeneidad de los datos. Esta medida es adimensional y permite en consecuencia comparar la variabilidad de características medidas en diferentes escalas. En esta ecuación  $\sigma$  es la desviación estándar y  $\bar{x}$  es el promedio de los valores (Di Rienzo *et al.*, 2005).

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \cdot 100$$

Ecuación 11: Coeficiente de variación  $C_v$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Establecimiento y desarrollo del cultivo

Con fecha 19 de agosto de 2013 se recibieron plantas de lechuga variedad Levistro de aproximadamente 30 días (contados desde la siembra), provenientes del vivero. Las plantas presentaron un promedio de cuatro hojas, entre 4 y 6 cm de altura, el pan de raíces completo y el cuello endurecido. Tras cuatro días de acostumbramiento de las plantas al interior del invernadero, fueron transplantadas el día 23 de agosto de 2013, considerado como el día n° 1 de las mediciones. El transplante se realizó sobre los 8 perfiles de cada mesa, sin embargo, al tercer día se eliminaron las plantas que presentaron más estrés al transplante, resultando 7 perfiles completos y uno de ellos inactivo. Durante los primeros nueve días, las plantas fueron abastecidas sólo con agua, a fin de su recuperación del estrés del transplante. Al décimo día, se le aplicó al agua del sistema hidropónico una solución nutritiva preparada, cuya calidad fue monitoreada a diario durante todo el ciclo del cultivo.

Las figuras 3, 4 y 5 presentan las condiciones de establecimiento del cultivo. La Figura 6 muestra el crecimiento de las plantas al día 20 del transplante.

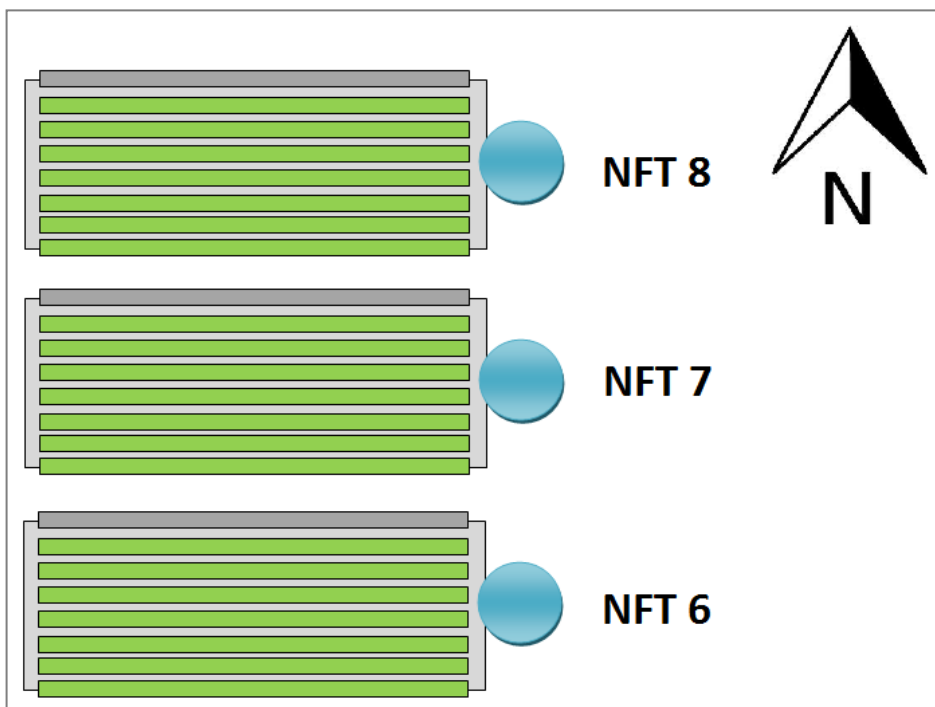


Figura 3. Orientación de las mesas de cultivo NFT en el invernadero



Figura 4. Vista frontal del invernadero al día 1.



Figura 5. Vista lateral del invernadero al día 1.





Figura 6. Plantas al día n° 20

#### Mediciones y parámetros

Durante el crecimiento se realizaron mediciones diarias de acidez (pH) y Conductividad Eléctrica (CE) para ajustar estos parámetros a las condiciones óptimas para la planta, además de la medición diaria del consumo de solución nutritiva (litros). Para ello se utilizó una vara graduada para cada estanque. Los resultados obtenidos para cada uno de las mesas de cultivo NFT se encuentran en el apéndice I.

La estimación de la huella gris se realizó mediante un análisis químico de la solución nutritiva al finalizar el proceso productivo.

**Consumo de Solución Nutritiva.** Se elaboró la siguiente solución nutritiva concentrada para 500 litros (Cuadro 1), distribuida en 3 estanques de 160 litros de agua potable cada uno. Fórmula entregada por personal del CEPOC.

Cuadro 1. Composición de la solución nutritiva.

Fertilizante	g/500 L
Nitrato de calcio	106.9
Nitrato de magnesio	334.2
Fosfato monopotásico	136.5
Nitrato de potasio	135.9
Nitrato de amonio	67.7
Acido bórico	0.571
Sulfato de manganeso	1.135
Sulfato de cobre	0.080
Molibdato de amonio	0.047
Ferrosol	20.667
Sulfato de zinc	0.875

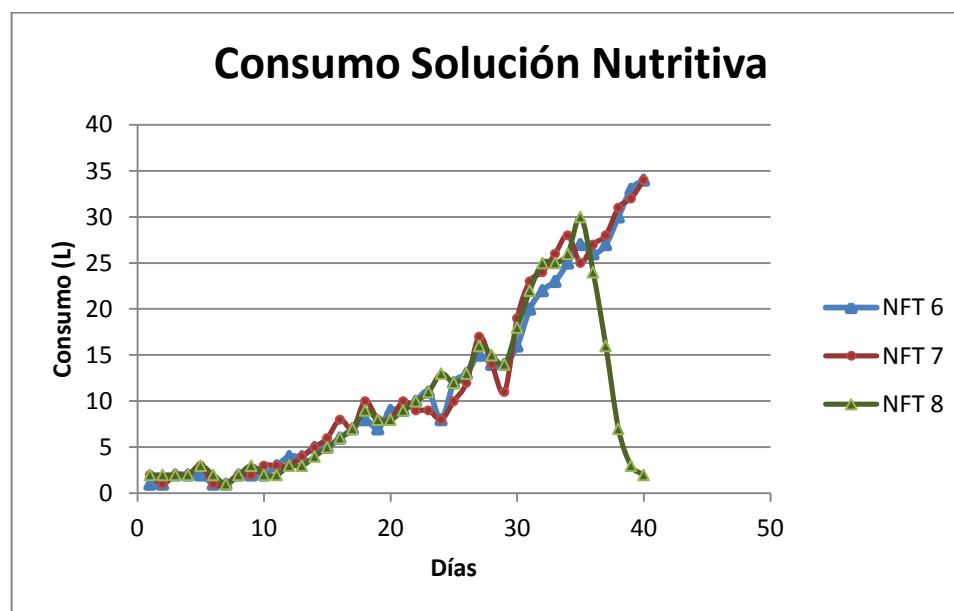


Figura 7. Consumo de solución nutritiva de cada mesa de cultivo.

En la Figura 7 se observa un aumento constante en el consumo de solución nutritiva para las tres mesas de cultivo hasta el día 35, sin embargo el consumo disminuye drásticamente en la mesa NFT 8 a contar del día 36. Se diagnostica deshidratación para las plantas de esta mesa, la cual se ubicó al lado norte del invernadero. Las plantas de las mesas 6 y 7 continuaron con crecimiento normal hasta el día de la cosecha.

**Rendimiento.** Se cosecharon las plantas al día 40 del transplante y se midió el peso fresco de 150 muestras de cada mesa obtenidas al azar. Al verificar que el peso fresco promedio de las plantas bordeaba los 50 gramos se realizó la cosecha. Con ello, considerando un total

de 525 plantas por cada mesa de cultivo, se estimó la producción total para cada uno de ellos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Peso fresco por planta y producción total estimada para cada mesa de cultivo.

Sistema NFT	$\bar{X}$ Peso Fresco	Producción total estimada
	g	kg
NFT 6	51,94	27,3
NFT 7	50,69	26,6
NFT 8	44,79	23,5



Figura 8. Tamaño de la planta cosechada

El registro de temperatura diaria (°C) en Santiago para el periodo comprendido entre la recepción de las plantas y la cosecha (periodo productivo) se grafica en la Figura 9. El detalle de las temperaturas registradas se encuentra en el Anexo I.

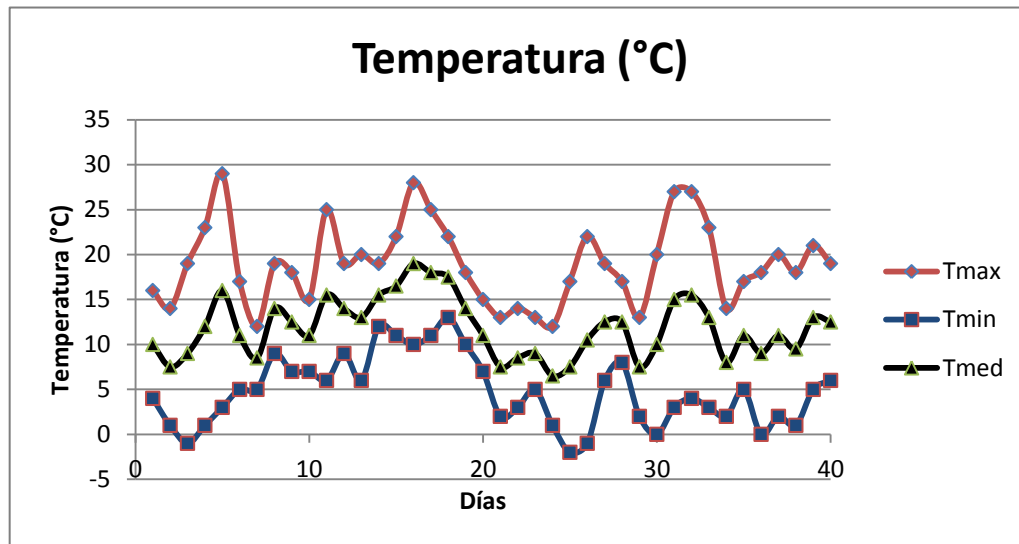


Figura 9. Temperatura media, mínima y máxima diaria para periodo productivo.  
Fuente: elaboración propia a partir de datos de Accu Weather.

### Análisis químico de solución nutritiva

El día de la cosecha (día 40) se recolectaron dos muestras de solución nutritiva para cada uno de los estanques: una muestra contenida en un envase de polietileno de 1 L de capacidad y la otra muestra contenida en un envase de vidrio de 500 mL de capacidad. Las muestras fueron rotuladas como NFT 6, NFT 7 y NFT 8; almacenadas en frío y llevadas a laboratorio para su análisis, según el protocolo dispuesto en el manual “Métodos de análisis de agua para riego” de Sadzawka (2006).

#### pH

La solución nutritiva debe presentar un pH levemente ácido. Se recomienda que su valor oscile entre 5,5 y 6,5; con un pH óptimo de 5,8. El control de este parámetro permite mantener disponibles los elementos nutritivos en la solución (Carrasco e Izquierdo, 1996). Respecto a este parámetro, la norma NCh1333 señala que el agua para riego debe tener un pH comprendido entre 5,5 y 9,0.

Para las mesas de cultivo NFT 6 y NFT 7 el pH se mantuvo en el óptimo. En la mesa NFT 8 se produjo una alteración de este parámetro, alcanzando un valor en el cual los nutrientes no se encuentran disponibles para las plantas. Se presume que esta diferencia se debe a la deshidratación sufrida por las plantas, las que cesaron el crecimiento al final del período por el calentamiento del estanque de solución nutritiva (Cuadro 3).

Cuadro 3. pH de la solución nutritiva

Muestra	pH	Temperatura
		°C
NFT 6	5,7	19,3
NFT 7	5,9	18,4
NFT 8	3,8	19,8

### Conductividad Eléctrica

Al operar un sistema NFT se requiere realizar controles diarios de la concentración de elementos nutritivos. Dado que determinar esto mediante un análisis químico diario es de muy alto costo, se sugiere estimar la concentración total de elementos nutritivos disueltos en solución por medio de la Conductividad Eléctrica (CE). Este estimador se basa en la proporcionalidad de la CE con la concentración de sales disueltas. Se recomienda un rango óptimo de 2 a 3  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  (Cadahía, 2000).

En el Cuadro 4 se presentan los resultados de la medición de CE las muestras de solución nutritiva. Dado que los valores de CE se encuentran por sobre el rango óptimo, se presume que existe uno o más nutrientes en alta concentración.

Cuadro 4. CE de la solución nutritiva

Muestra	CE	Temperatura
	$\text{dS m}^{-1}$	°C
NFT 6	3,7	19,3
NFT 7	3,6	18,3
NFT 8	3,7	19,6

Valores de CE que bordean los 3 a 4  $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$  presentan salinidad muy alta, siendo adecuada para el riego bajo ciertas precauciones. Según las normas Riverside, establecidas en 1954 por el Laboratorio de Salinidad de Estados Unidos (U.S.S.L., por sus siglas en inglés) esta agua cae en el tipo C4, cuyo uso se recomienda sólo para suelos muy permeables y con buen drenaje y para riego de cultivos muy tolerantes a la salinidad (Cadahía, 2000). La norma NCh1333 clasifica al agua bajo restricciones similares (Cuadro 5).

Cuadro 5. Clasificación del agua para riego según CE.

Clasificación	Conductividad Eléctrica $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$
Agua con la cual no se observan efectos perjudiciales	$<0.75$
Agua que puede tener efectos perjudiciales	$0.75 < \text{CE} < 1.5$
Agua que puede tener efectos adversos en muchos cultivos y necesita de métodos de manejo cuidadosos	$1.5 < \text{CE} < 3.0$
Agua que puede ser usada para plantas tolerantes en suelos permeables con métodos de manejo cuidadosos	$3.0 < \text{CE} < 7.5$

Fuente: Norma NCh1333 de calidad de agua para riego

### Cationes disueltos

Se realizó la estimación de cationes calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ ) en la solución nutritiva mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica. El Cuadro 6 presenta un resumen del contenido de cationes en las muestras de solución nutritiva de cada mesa de cultivo.

Cuadro 6. Contenido de cationes en solución nutritiva.

Muestra	Ca $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Mg $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Na $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	K $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
NFT 6	460	40	43,8	4,08
NFT 7	440	40	46,4	4,90
NFT 8	440	40	43,4	6,96

El contenido de cationes permite calcular dos parámetros presentes en la norma utilizada: Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y Sodio porcentual (Na%).

### Relación de Adsorción de Sodio

Para el cálculo de la RAS (Ecuación 12) se requirió obtener las concentraciones de calcio, magnesio y sodio en  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ . Para ello, se consideró el peso molecular de los cationes, correspondientes a 40,078; 24,305 y 22,98  $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ , respectivamente. En el Cuadro 7 se presentan los resultados de la RAS para cada mesa de cultivo.

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}}$$

Ecuación 12. Relación de Adsorción de Sodio

Donde:

Na= concentración, en  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , de Na disuelto.

Ca= concentración, en  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , de Ca disuelto.

Mg= concentración, en  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , de Mg disuelto.

Cuadro 7. RAS de solución nutritiva

Muestra	Ca	Mg	Na	RAS
	$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	
NFT 6	22,96	3,29	1,91	0,53
NFT 7	21,96	3,29	2,00	0,57
NFT 8	21,96	3,29	1,89	0,53

Según las recomendaciones de Cadahía (2000) para fertirrigación, la RAS que bordea el valor 0,5 se clasifica como muy baja, correspondiente a agua de riego de buena calidad, que puede ser usada para tal finalidad en todos los casos. Para este parámetro, la norma NCh1333 señala que la autoridad competente debe establecer su valor en cada caso específico, sin indicar valores precisos.

### Sodio Porcentual

El sodio porcentual (Na%) es una relación entre la concentración del ión sodio y la suma de las concentraciones de los iones sodio, calcio, magnesio y potasio, expresadas en miliequivalentes por litro ( $\text{mEq} \cdot \text{L}^{-1}$ ). Para su cálculo se emplea la siguiente expresión (Ecuación 13):

$$Na\% = \frac{Na}{Na + Ca + Mg + K} \times 100$$

Ecuación 13. Sodio porcentual

Donde:

Na= concentración, en  $\text{mEq} \cdot \text{L}^{-1}$ , de Na disuelto.

Ca= concentración, en  $\text{mEq} \cdot \text{L}^{-1}$ , de Ca disuelto.

Mg= concentración, en  $\text{mEq} \cdot \text{L}^{-1}$ , de Mg disuelto.

K= concentración, en  $\text{mEq} \cdot \text{L}^{-1}$ , de K disuelto.

Cuadro 8. Na% de la solución nutritiva

Muestra	Ca	Mg	Na	K	Na%
	mEq·L <sup>-1</sup>	mEq·L <sup>-1</sup>	mEq·L <sup>-1</sup>	mEq·L <sup>-1</sup>	
NFT 6	22955,24	3291,50	1905,20	104,35	6,74
NFT 7	21957,18	3291,50	2018,29	125,33	7,37
NFT 8	21957,18	3291,50	1887,80	178,01	6,91

La norma NCh1333 indica como valor máximo de Na% el 35,00% en agua para riego. Los resultados obtenidos (Cuadro 8) muestran que el valor de Na% de la solución nutritiva es muy bajo. Según las normas Riverside, su clasificación es S1, constituyendo un agua con bajo contenido de sodio, apta para el riego en la mayoría de los casos (Cadahía, 2000).

### Aniones disueltos

#### Cloruro y sulfato.

El contenido de cloruro (Cl<sup>-</sup>) en la solución nutritiva (Cuadro 9) registró valores muy similares al contenido del agua de pozo del campus Antumapu (Anexo II), cuyas concentraciones bordean los 120 mg·L<sup>-1</sup>, valor bajo la norma, correspondiente a 200 mg·L<sup>-1</sup>. En el caso del sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>), a pesar de que gran parte de las sales para la elaboración de la solución nutritiva son sales sulfatadas, la concentración de este anión es menor a la registrada en los análisis al agua del campus Antumapu y menor a la indicada por la norma NCh1333 de calidad de agua para riego. Se puede inferir, entonces, que la aplicación de sales sulfatadas en la solución nutritiva se realizó en cantidades óptimas y fueron eficientemente aprovechadas por las plantas.

Cuadro 9. Contenido de aniones Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> en la solución nutritiva.

Muestra	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
	mg·L <sup>-1</sup>	mg·L <sup>-1</sup>
NFT 6	131,165	100,00
NFT 7	152,435	131,25
NFT 8	124,075	187,50

### Macronutrientes

Los macronutrientes de las plantas son nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). Los tres primeros son requeridos en mayor cantidad, por lo que la fertilización de cultivos suele estar centrada en ellos, especialmente de la fertilización nitrogenada (Domínguez, 1999).



Se determinó el contenido de los macronutrientes N, P y K en la solución nutritiva. El contenido de K ya ha sido determinado en el conjunto de los cationes. El contenido de N se determinó como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), mientras que el contenido de P se determinó como fósforo disuelto total. La norma NCh1333 no establece como parámetro de calidad el contenido de nitratos, fósforo o potasio, ya que al tratarse de agua para riego estos nutrientes estarán presentes en alta concentración. La norma NCh403/2 establece como límite de contenido de nitrato  $50 \text{ mg L}^{-1}$ , contenido ampliamente superado por la solución nutritiva. En el caso de P y K, esta norma no los utiliza como parámetro de calidad.

Los resultados de la estimación de los macronutrientes considerados se encuentran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Contenido de macronutrientes N, P y K en solución nutritiva

Muestra	$\text{NO}_3^-$ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	P $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	K $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
NFT 6	108,64	30	4,08
NFT 7	123,13	50	4,90
NFT 8	131,47	50	6,96

Tras estos resultados, se presume que uno de los nutrientes en elevada concentración que originó el alto valor de CE podría ser el nitrógeno.

### Micronutrientes

Los micronutrientes de las plantas son hierro (Fe), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloro (Cl) (Domínguez, 1999). Todos ellos son utilizados como parámetro de calidad en la norma NCh1333. Se decidió realizar medición de los cuatro primeros micronutrientes por su relevancia en los análisis químicos de agua, considerando que B y Mo suelen encontrarse en muy bajas concentraciones y no son relevantes para el caso de este estudio<sup>1</sup>. El cloro fue medido en el grupo de los aniones, como cloruro.

La concentración de los micronutrientes Cu, Mn, Zn y Fe son presentados en el Cuadro 11.

<sup>1</sup> Comunicación personal con Yasna Tapia F., profesora encargada de Laboratorio de Química de Suelos y Aguas, Fac.Cs. Agronómicas, Universidad de Chile, 2013.

Cuadro 11. Contenido de micronutrientes Cu, Mn, Zn y Fe en solución nutritiva

Muestra	Cu	Mn	Zn	Fe
	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>
NFT 6	0,10	0,25	0,18	0,5
NFT 7	0,12	0,11	0,09	1,4
NFT 8	0,11	0,23	0,16	0,5

## HUELLA HÍDRICA

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la huella azul y huella gris, estimados según la adaptación propuesta a la metodología de la WFN.

### Huella Azul

Conocidos el consumo de solución nutritiva y la producción total estimada, se calcula la huella azul de la producción según las ecuaciones 5 y 6. La huella azul estimada se presenta en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Estimación de la huella azul.

Mesa de cultivo	Consumo SN ( $ET_{azul}$ )	Producción Total ( $P$ )	Uso de Agua del Cultivo ( $CWU_{azul}$ )	Huella azul ( $WF_{proc. azul}$ )
	L	Kg	$m^3$	$m^3 \cdot ton^{-1}$
NFT 6	463	27,3	0,463	16,96
NFT 7	478	26,6	0,478	17,97
NFT 8	387	23,5	0,387	16,47

### Huella Gris

El cálculo de la huella gris se realizó según la metodología propuesta (Ecuación 8), donde  $C_{sol}$  es el valor registrado para cada mesa de cultivo NFT,  $C_{max}$  es el valor máximo permitido por la norma NCh1333,  $Y$  corresponde al rendimiento del cultivo (ton) y  $V_{sol}$  representa el volumen de solución nutritiva consumido proporcional para alcanzar 1 ton de rendimiento, expresado en  $m^3$ . Este último valor se calcula a partir del volumen de solución nutritiva que es devuelta al medio ambiente tras la cosecha del producto, y corresponde al volumen con que se mantuvo funcionando cada estanque durante el periodo productivo: 160 L.

Al comparar los valores de los parámetros registrados con la norma NCh1333, se observa que sólo el manganeso sobrepasa los valores máximos permitidos, por lo cual es el único parámetro determinante de la huella gris. La mesa de cultivo NFT 7 no registra altos valores de manganeso, por lo cual ninguno de sus parámetros sobrepasa el máximo permitido y su huella gris es 0. La huella gris del sistema analizado se presenta en el Cuadro 13. El detalle de los resultados de encuentra en el apéndice II.

Cuadro 13. Estimación de la huella gris

Parámetro	Unidad	NFT 6	NFT 7	NFT 8	Límites permitidos
Na%	%	6,74	7,37	6,91	35
Cl <sup>-</sup>	mg·L <sup>-1</sup>	131,17	152,44	124,08	200
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg·L <sup>-1</sup>	100	131,25	187,5	250
Cu	mg·L <sup>-1</sup>	0,1	0,12	0,11	0,20
Mn	mg·L <sup>-1</sup>	0,25	0,18	0,23	0,20
Zn	mg·L <sup>-1</sup>	0,18	0,09	0,16	2,00
Fe	mg·L <sup>-1</sup>	0,5	0,7	0,5	5,00
Huella gris	m <sup>3</sup> ·ton <sup>-1</sup>	1,47	0	1,02	

Al realizar el estudio se hallaron algunas limitaciones prácticas con respecto a la obtención y calidad de los datos para el cálculo de la huella gris, así como ciertas salvedades a la aplicación de la metodología de la WFN.

- i. El valor de la huella gris depende de las normativas aplicadas.

La huella gris equivale a la cantidad de agua necesaria para diluir los contaminantes utilizados en la cadena productiva, y su valor depende de las normativas ambientales de calidad de agua. Las concentraciones máximas permitidas para cada contaminante están dadas por normas de calidad ambiental que rijan en el lugar de estudio (Hoekstra *et al.*, 2009). Por ello, la huella gris podría variar en distintos estados o países según lo estricto de sus normas.

Las exigencias de las normativas suelen estar más relacionadas con el nivel de desarrollo de los países que con la vulnerabilidad de los ecosistemas. Es así como países menos desarrollados tienen normas menos restrictivas, por ende, su huella gris sería menor, aún en igualdad de condiciones geográficas o climáticas. De lo contrario, si la normativa es más exigente, la huella gris aumenta (Broussain, 2011; Pardo, 2011).

Estas diferencias en el valor de la huella gris dificultan la obtención de un valor referencial mundial. El uso del indicador requiere de valores estandarizados que faciliten su uso, por ejemplo, para el etiquetado de productos o el cumplimiento de las normas ISO.

En el caso de este estudio, la huella gris podría resultar mayor si se aplicara la norma NCh409/1 de calidad de agua potable en vez de la norma NCh1333 de calidad de agua para riego, puesto que la primera posee valores mínimos inferiores a la segunda en los parámetros químicos analizados y contiene además otros parámetros, como el nitrato. Para

la estimación de la huella gris, en caso de aplicar la norma NCh409/1, los parámetros nitrato, hierro y manganeso habrían elevado su valor en 26,39 veces, superando incluso el valor de la huella azul (Apéndice III).

- ii. Falta de normativas de calidad de agua de los cuerpos receptores.

Para el caso de Chile se ha evidenciado la falta de normativas para calidad de aguas tanto superficiales como subterráneas, contando sólo con la norma NCh409/1 de calidad de agua potable. En cuanto al contenido de contaminantes, el Decreto Supremo ds 46 señala la concentración máxima de contaminantes que puede ser vertida a los cuerpos de agua, pero no la concentración máxima de contaminantes que puede contener, por lo que no siempre se cuenta con un valor de referencia que permita el cálculo de la huella gris. Por otro lado, la huella gris expresada como  $m^3$  de agua necesaria para diluir un contaminante asume que esta agua no se encuentra previamente contaminada o no contiene al elemento en cuestión. Sin embargo, mientras no exista información actualizada y completa sobre la calidad de los cuerpos receptores este supuesto puede estar lejos de la realidad.

La metodología de la WFN señala que los cálculos de huella gris deben realizarse con las normas ambientales de calidad de agua para el cuerpo receptor, es decir, las normas con respecto a las concentraciones máximas permisibles según las condiciones naturales del cuerpo de agua. Las normas de calidad de agua potable, agua para riego y de emisión constituyen otro tipo de normas, que no son las recomendadas para el cálculo (Hoekstra *et al.*, 2011). Sin embargo, debido a la falta de información sobre las concentraciones naturales de contaminantes en Chile y la escasa legislación sobre las concentraciones máximas permitidas, no se dispone de datos suficientes para aplicar esta metodología. Por ello, se utilizó la concentración de contaminantes legal en vez de la natural, basando el cálculo en la norma NCh1333 de calidad de agua para riego.

Otros estudios de huella hídrica han utilizado las normas de emisión de residuos líquidos a cuerpos de agua. Sin embargo, la norma de emisión es única para todo el territorio nacional, ante lo cual es indiferente realizar la descarga en una zona de abundancia o de escasez hídrica, aún cuando los impactos ambientales en ambos casos serían completamente diferentes. A pesar de que éste es un problema de legislación y no del indicador como tal, constituye una limitante para su uso adecuado.

### **Huella Hídrica Total**

Calculadas la huella azul y la huella gris, se obtiene la huella hídrica para el cultivo (Cuadro 14). La huella hídrica obtenida para el cultivo de lechuga hidropónica tamaño “baby” es de aproximadamente  $18 m^3 \cdot ton^{-1}$ , valor muy inferior al calculado por Mekonnen y Hoekstra (2011) para cultivo extensivo de lechuga, correspondiente a  $237 m^3 \cdot ton^{-1}$ . Entre los factores influyentes para este resultado, se tiene que las huellas azul y gris son muy

bajas, la huella verde es cero y la lechuga tamaño “baby” tiene un ciclo de cultivo más corto que la lechuga tamaño normal.

Cuadro 14. Estimación de la huella hídrica

Sistema NFT	Huella azul $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$	Huella gris $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$	Huella hídrica $\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$
NFT 6	16,96	1,47	18,43
NFT 7	17,97	0,00	17,97
NFT 8	16,47	1,02	17,49

Como se observa en el Cuadro 14, la mayor contribución al valor total de la huella es de la huella azul, la que alcanza el 92, 100 y 94 por ciento para los sistemas NFT 6, 7 y 8 respectivamente.

En la estimación de huella hídrica para cultivo extensivo de lechuga realizado por Mekonnen y Hoekstra (2011), más de la mitad de la huella total fue aportada por la huella azul, mientras que la huella gris aportó un 32,5% y la huella verde un 11,8%. En el caso de este estudio, el 95% correspondió a huella azul y el resto a huella gris (Figura 10). Para el cálculo, Mekonnen y Hoekstra (2011) utilizaron un modelo de balance hídrico para calcular el consumo de agua de parte del cultivo y el modelo CROPWAT para determinar la evapotranspiración del cultivo. Para la huella gris, consideraron la contaminación causada por fertilizantes nitrogenados, utilizando el valor máximo recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés), que corresponde a  $10 \text{ mg L}^{-1}$  medido como nitrato-nitrógeno ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), siguiendo las recomendaciones de Chapagain *et al.* (2006).

Mekonnen y Hoekstra (2010) señalan que el 86,5% del agua dulce consumida en la producción de cultivos a nivel global corresponde a agua verde, tanto en la agricultura de secano como de regadío. Sin embargo, la costa oeste de América del Sur, ocupada por Perú y Chile, representa una de las zonas cuya huella azul tiene mayor participación en la huella total que la huella verde, situación que ocurre también en la parte occidental de los EE.UU., en el sur de Europa, norte de África, la Península Arábiga, Asia Central, Pakistán y norte de la India, el noreste de China y partes de Australia.

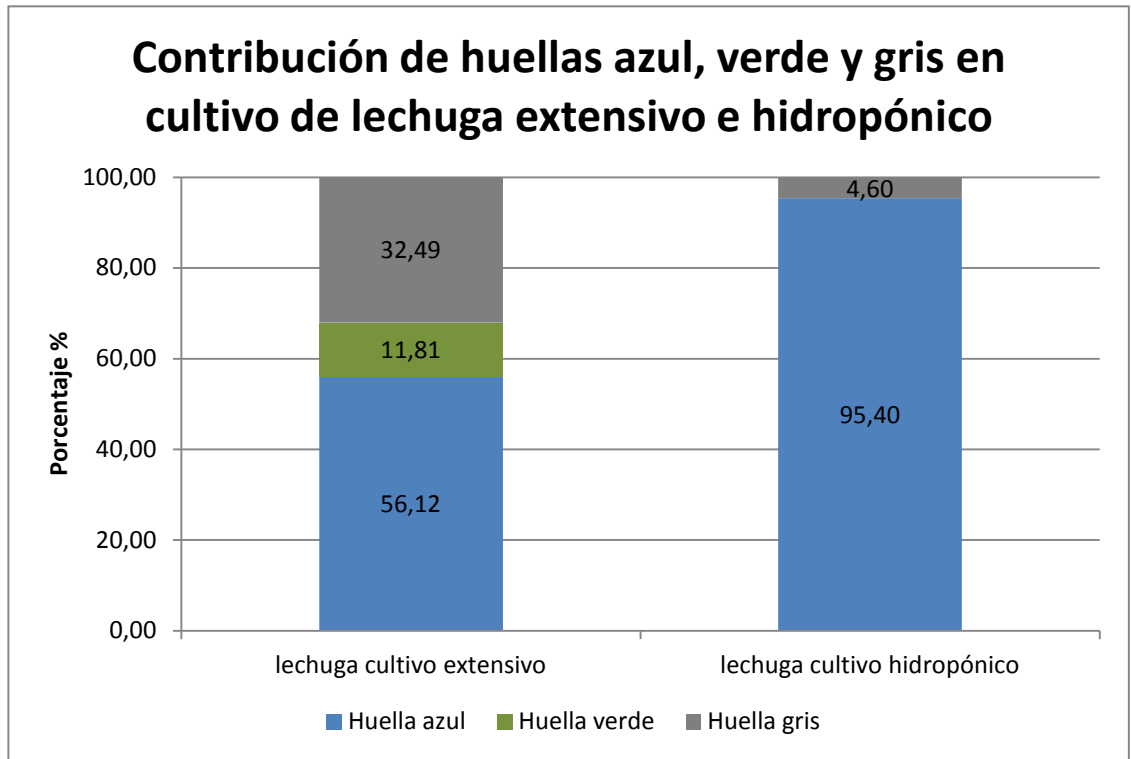


Figura 10: Contribución de huellas azul, verde y gris en cultivos de lechuga.

La huella hídrica de un producto es la suma de las huellas hídricas de cada proceso de la cadena productiva necesaria para obtener el producto. Sin embargo, el manual de la WFN no entrega un método estandarizado que indique variables como los límites de la cadena productiva y el periodo de tiempo a analizar (Hoekstra *et al.*, 2009), sino que constituye una guía metodológica con ajustes y alcances de acuerdo al área productiva a tratar.

Debido a que la expansión del uso de este indicador es reciente, aún existe falta de información acerca del agua consumida para producir los insumos utilizados, lo que impide una estimación precisa de la huella hídrica del cultivo. Por ello se trabajó bajo el supuesto de que la contribución de los insumos a la huella hídrica total es menor al 5% del consumo total de agua y por recomendación de Hoekstra *et al.* (2009) se puede eliminar de la contabilidad de la huella. Un estudio completo de huella hídrica debería considerar el valor de las huellas hídricas de sus insumos, de modo que permita conocer el nivel de impacto y la sustentabilidad de todo el proceso productivo.

En cuanto a la sustentabilidad de la huella estimada, Hoekstra *et al.* (2010) señalan que las huellas verde, azul y gris de un proceso no son sustentables en sí mismas cuando éstas pueden ser eliminadas o reducidas con tecnología disponible y a un costo social aceptable. Debido a la eficiencia de los sistemas hidropónicos en el suministro de agua, donde se puede considerar la evaporación igual a cero y la transpiración como irreductible, es que se puede suponer la huella azul como una huella sustentable y que no puede ser reducida.

La huella gris se podría reducir al aplicar los fertilizantes a menores tasas, pero como no son evitables por completo, Hoekstra *et al.* (2010), indican que la huella gris siempre es considerable como no sustentable dentro de un proceso. Sin embargo, se debe analizar la sustentabilidad de la aplicación de fertilizantes en la solución nutritiva para evaluar si es posible reducir o eliminar la huella gris en la producción de lechuga hidropónica. En el caso de este estudio, se comprobó que las dosis de sales para la solución nutritiva tienen un alto nivel de precisión de acuerdo a lo requerido por las plantas, ya que son restos mínimos los que permanecen en la solución nutritiva de desecho. Por ello, sólo el magnesio resultó con un valor mayor al permitido en el estándar de la norma NCh1333, siendo el único contribuyente a la huella gris del cultivo.

Una posible medida para disminuir el valor de la huella gris, además de aumentar la precisión en la dosis de fertilizante, es el uso de hidroponía orgánica. Estos sistemas de producción, en donde la solución nutritiva se modifica mediante fertilización orgánica, han logrado disminuir problemas de contaminación (Rinaldi *et al.*, 2007). Sin embargo, este tipo de producción es un área recientemente explorada y orientada más a nivel de agricultura familiar (Marulanda e Izquierdo, 2003), requiriéndose mayores estudios para su aplicación a nivel industrial en nuestro país.

### Análisis estadístico

Análisis estadístico descriptivo sobre los resultados de la huella hídrica obtenidos para cada mesa de cultivo hidropónico.

Cuadro 15: Parámetros estadísticos HH total

Mesa de cultivo	HH total	Media aritmética $\mu$	Desviación estándar $\sigma$	Coefficiente de variación Cv
	$\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$	$\text{m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$		%
NFT 6	18,43			
NFT 7	17,97	17,96	0,38	2,12
NFT 8	17,49			

En el Cuadro 15 se presentan los valores obtenidos para los tres parámetros estadísticos escogidos: media aritmética poblacional (Ecuación 9), desviación estándar poblacional (Ecuación 10) y coeficiente de variación (Ecuación 11).

La media aritmética o promedio de la huella hídrica obtenida es de  $17,96 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ . El coeficiente de variación resultante es de sólo un 2,12%, lo que según la bibliografía



consultada (Di Rienzo *et al.*, 2005) es muy bajo, por lo que los datos serían muy homogéneos. La gráfica de los resultados obtenidos se presenta en la Figura 11.

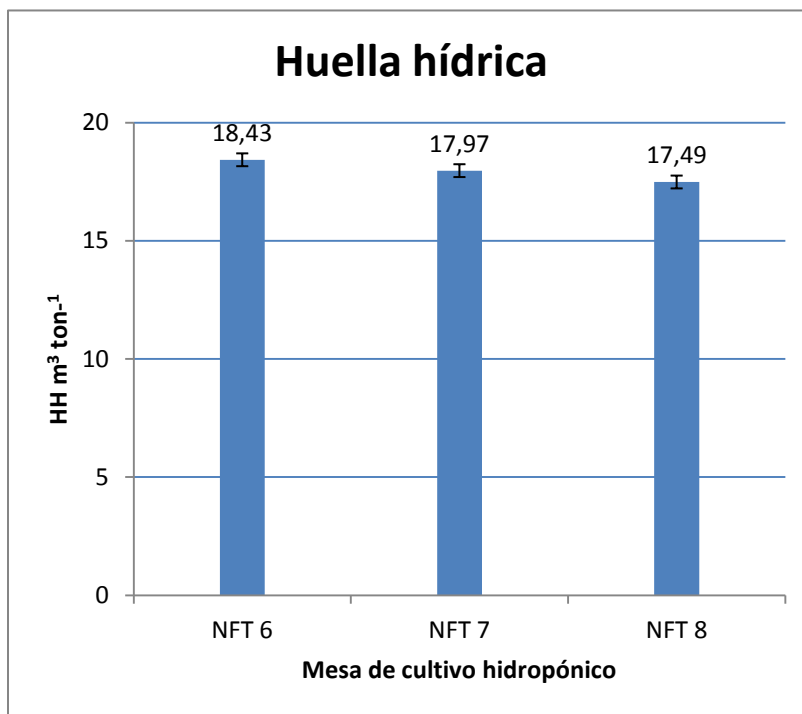


Figura 11: Huella hídrica de cada mesa de cultivo hidropónico.

Finalmente, se concluye que la huella hídrica de un cultivo hidropónico de lechuga tamaño “baby” bajo invernadero es de  $17,96 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ , de la cual el 95,4% corresponde a huella azul, el 4,6% a huella gris y el 0% a huella verde.

## CONCLUSIONES

Este estudio representa el primer trabajo realizado en Chile sobre el uso de la huella hídrica en una producción hidropónica bajo invernadero. Además, es parte de los recientes estudios que existen de este indicador a nivel mundial.

En este trabajo se realizó una propuesta metodológica al protocolo de la WFN para la estimación de huella hídrica, adaptada a las condiciones del cultivo, constituyendo una herramienta simple, útil y de fácil aplicación para futuros trabajos sobre huella de agua en producción hidropónica bajo invernadero.

Con respecto a los valores encontrados en la literatura acerca de la huella hídrica en la producción de lechuga, existe una amplia diferencia entre el valor obtenido en este trabajo y el estimado por Mekonnen y Hoekstra (2011). La huella hídrica obtenida es aproximadamente  $19 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ , valor muy inferior al indicado para cultivo extensivo de lechuga, que corresponde a  $237 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ . Tal diferencia se asocia a las condiciones eficientes del cultivo hidropónico bajo invernadero, que a diferencia del cultivo extensivo, presenta una huella azul que considera casi únicamente transpiración y no evaporación. Por otro lado, el valor de huella gris es muy bajo, puesto que la dosis de fertilizante aplicado en la solución nutritiva está estrechamente relacionada con la demanda del cultivo. En el caso del nitrógeno, el análisis químico arrojó una alta cantidad disuelta en la solución nutritiva en forma de nitrato, por lo que en futuros cultivos se recomendaría disminuir la dosis de este tipo de fertilizantes.

Es importante destacar que los valores obtenidos están subestimados. Esto se debe a que se omitieron una serie de consumos de agua, que a pesar de ser aportes menores, generarían un incremento de la huella hídrica. Entre los valores omitidos se encuentran principalmente el consumo de agua de los plantines en el vivero, además de las huellas hídricas de los insumos utilizados en la cadena de producción.

Se encontraron limitaciones metodológicas para la obtención de la huella gris, debido a su dependencia con respecto a las normas de calidad y a la falta de ellas en Chile. Existieron además limitaciones prácticas referidas a la disponibilidad de datos sobre concentración natural de contaminantes en los cuerpos de agua de la Región Metropolitana, por lo cual se debió utilizar el estándar calidad de agua para riego de la Norma Chilena Oficial NCh1333. Of.78. Asimismo, existe falta de datos sobre los consumos indirectos de agua para la producción.

Finalmente se concluye que el indicador huella hídrica es una herramienta útil para medir el consumo de agua de la producción de lechuga bajo cultivo hidropónico, considerando ciertas salvedades en la aplicación de la metodología.

Se comprueba que la producción de lechuga bajo invernadero en sistema hidropónico es mucho más eficiente en el uso del agua que el sistema extensivo, por lo que su uso debiera ser fomentado en zonas de escasez hídrica.

Dados los actuales conflictos por el uso del espacio ante las capacidades y limitaciones del sistema natural y la necesidad de compatibilizar las actividades humanas con el entorno, el uso de indicadores como la huella hídrica toma relevancia y debiera ser considerado en la planificación y la toma de decisiones de gestión territorial. La cuantificación de la huella hídrica no es una herramienta concluyente para la toma de decisiones, pero sí constituye el primer paso para realizar una evaluación de la huella hídrica, que incluye un posterior análisis de sustentabilidad ambiental, social y económica, además de la formulación de una estrategia de respuesta a los posibles conflictos identificados.

Es necesario continuar con la aplicación de este indicador a un mayor número de bienes y servicios, a fin de obtener una huella hídrica que considere además la cadena de suministros. De esta manera, el uso del indicador puede aportar al desarrollo sustentable del rubro hortícola y constituir una buena herramienta para la gestión de los recursos hídricos.

## BIBLIOGRAFÍA

Allan, J.A. 1998, july. Virtual water: a strategic resource. Global solutions to regional deficits. *Groundwater*, 36(4): 545-546.

Bermejillo, A.I.; M.F. Filippini; F. Pimpini; E.R. Antonioli y G. Naranjo. 2006. Una alternativa a la producción sustentable en Mendoza: Cultivo de rúcula y otras aromáticas en sistema de raíz flotante. Universidad Nacional de Cuyo, Luján de Cuyo, Mendoza. Argentina. 13p.

Broussain, J. 2011. Análisis y aplicación de una metodología para el cálculo de la huella hídrica a nivel predial de la producción lechera en Chile. Memoria Ingeniero Civil. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 80p.

Cadahía, C. 2000. Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. 2ª Edición. Madrid: Ediciones Mundi-prensa. 475p.

Calandra, P.; D. Ortiz; G. Pozo y B. Noziglia. 2012. Manual para la redacción de referencias bibliográficas. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 84p.

Carrasco, G. y J. Izquierdo. 1996. La empresa hidropónica de mediana escala: La técnica de la solución nutritiva recirculante (“NFT”). Manual técnico, Universidad de Talca – FAO Chile. 105p.

Chapagain, A.K.; A.Y. Hoekstra; H.H.G. Savenije and R. Gautam. 2006. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries, *Ecological Economics* 60(1): 186–203.

Di Rienzo, A.; F. Casanoves; A. González; E. Tablada; M. Díaz; C. Robledo y M. Belzarini. 2005. Estadística para las ciencias agropecuarias. Sexta edición. Córdoba: Editorial Brujas. 329p.

Domínguez, V. 1997. Tratado de Fertilización. 3ra. Edición. Madrid: Ediciones Mundi-prensa. 613p.

Donoso, G y G. Franco. 2013. La huella hídrica agrícola de Chile. *Voz académica Agronomía y Forestal* 47 (1): 10-15.

Encalada, M.E. 2000. Evaluación agronómica de cultivares de lechuga del tipo “Baby” bajo sistema de cultivo hidropónico. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 80p.

Fishelson, G. 1989. Economic cooperation in the Middle East. Tel Aviv University. Westview Press, Boulder. 372p.

Fundación Chile. Medición de la huella del agua. [En línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <[http://www.fundacionchile.com/archivos/Concha\\_Toro.docx](http://www.fundacionchile.com/archivos/Concha_Toro.docx)>. Consultado el: 18 de diciembre de 2012.

Gleick, P.H. 1993. Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources. Oxford, UK: Oxford University Press. 473p.

Goyal, R.K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan, India. *Agricultural Water Management*, 69(1): 1-11.

Hoekstra, A.Y. 2003. Virtual Water Trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade. Value of Water Research Report Series No. 12. 246p.

Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. 2008. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. 1<sup>st</sup> Edition. Oxford, UK: Willey-Blackwell. 232p.

Hoekstra, A.Y. and Hung, P. Q. 2002. Virtual water trade, a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Value of Water Research Report Series No. 11. 119p.

Hoekstra, A.Y.; A. Chapagain; M. Aldaya, and M. Mekonnen. 2011. The water footprint assessment manual: setting the global standard. 1<sup>st</sup> Edition. London, UK: Earthscan. 224p.

International Organization of Standardization ISO. Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines. [en línea] <[http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=43263](http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=43263)> [consulta: 17 diciembre 2014]

Instituto Nacional de Normalización, Chile. NCh409/1.Of2005. Agua potable – Parte 1: Requisitos = Drinking water – Part 1: Requirements. Santiago, Chile: INN, 2005. 9p.

Instituto Nacional de Normalización, Chile. NCh1333.Of78. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos = Water quality requirements for different uses. Santiago, Chile: INN, 1987. III, 9p.

Marulanda, C y J. Izquierdo. 2003. La huerta hidropónica popular. Curso Audiovisual. 3ra Edición. Santiago: FAO Regional Office. 132p.

Mekonnen, M.M and A.Y. Hoekstra. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hidrology and Earth System Sciences Journal* 15(5): 1577-1600.

ODEPA (Oficina de estudios y políticas agrarias). Estimación de superficie cultivada con hortalizas a nivel nacional. Estadísticas productivas de hortalizas. [En línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://www.odepa.cl/superficie-cultivada-con-hortalizas-3/>>. Consultado el: 08 de mayo de 2013.

Pardo, F. 2011. Análisis de la huella hídrica como indicador del consumo de agua en la producción de uva de mesa en un predio en la cuenca del río Limarí, Chile. Memoria Ingeniero Civil. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 73p.

Postel, S.L. 2000, aug. Entering an era of water scarcity: The challenges ahead. *Ecological Applications* 10(4), 941–948.

Rinaldi, M.; G. Convertini and A. Elia. 2007. Organic and mineral nitrogen fertilization for processing tomato in Southern Italy. *Acta Horticulturae* 758:241-248.

Sádaba, S.; J. Del Castillo; M. Astriz; J. Sanz De Galdeano; A. Uribarri y G. Aguado. 2008 sep-oct. Cultivo hidropónico de lechuga. *Navarra Agraria* 170(1): 31-36.

Sadzawka, A. 2006. Métodos de análisis de agua para riego. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie actas INIA N°37, Santiago, Chile. 332p.

Shiklomanov, I.A. 2000. Appraisal and Assessment of World Water Resources. *Water International* 25(1):11-32.

SuizAgua Chile. [En línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://suizagua.org/b/chile/#/home>>. Consultado el: 07 de septiembre de 2014.

Villavicencio, A.; J.L. Arumí y E. Holzapfel. 2011. Planificación de recursos hídricos en zonas de secano usando un modelo de optimización no lineal. [En línea]. *Obras y Proyectos*, 10(1): 73-80. Recuperado en: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-28132011000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132011000200007&lng=es&nrm=iso&tlng=es)> Consultado el: 17 de agosto de 2014.

World Water Assessment Programme (WWAP). 2009. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a changing world. Paris: UNESCO Publishing. London: Earthscan. 429p.

## ANEXOS

## Anexo I. Temperatura

Temperatura máxima, mínima y media (°C) en Santiago, según datos de Accu Weather.

Fecha	T max	T min	T media
	°C	C°	°C
24/08/13	16	4	10
25/08/13	14	1	7,5
26/08/13	19	-1	9
27/08/13	23	1	12
28/08/13	29	3	16
29/08/13	17	5	11
30/08/13	12	5	8,5
31/08/13	19	9	14
01/09/13	18	7	12,5
02/09/13	15	7	11
03/09/13	25	6	15,5
04/09/13	19	9	14
05/09/13	20	6	13
06/09/13	19	12	15,5
07/09/13	22	11	16,5
08/09/13	28	10	19
09/09/13	25	11	18
10/09/13	22	13	17,5
11/09/13	18	10	14
12/09/13	15	7	11
13/09/13	13	2	7,5
14/09/13	14	3	8,5
15/09/13	13	5	9
16/09/13	12	1	6,5
17/09/13	17	-2	7,5
18/09/13	22	-1	10,5
19/09/13	19	6	12,5
20/09/13	17	8	12,5

(Continúa)

Continuación Temperatura máxima, mínima y media (°C) en Santiago, según datos de Accu Weather

Fecha	T max	T min	T media
	°C	C°	°C
21/09/13	13	2	7,5
22/09/13	20	0	10
23/09/13	27	3	15
24/09/13	27	4	15,5
25/09/13	23	3	13
26/09/13	14	2	8
27/09/13	17	5	11
28/09/13	18	0	9
29/09/13	20	2	11
30/09/13	18	1	9,5
01/10/13	21	5	13
02/10/13	19	6	12,5



## Anexo II. Análisis de agua campus Antumapu



LABORATORIO AGRICOLA  
ANÁLISIS DE SUELO - FOLIAR - AGUA  
FITOPATOLOGÍA

INFORME DE RESULTADOS - N° Orden: 97.003  
ANÁLISIS AGUA

Productor : Francisco Fernandez  
Predio :

Empresa :  
Remite : Francisco Fernandez

Provincia : Santiago  
Comuna : La Pintana  
Localidad : La Pintana

Fecha muestreo : 30-11-2012 F.ingreso : 30-11-2012  
Fecha análisis : 30-11-2012 F.informe : 10-12-2012

Pag. 1/1

Identificación muestra	:	Agua De Pozo Antumapu	Interpretación para Riego	
			Nch1333	Agronomico
Origen	:	Pozo	Limite máx	Riesgo de uso
N° de Laboratorio	:	27035	(1)	Ninguno Alto
pH		7,83	5,5 - 9,0	6,5 - 8,4
C.Eléctrica	dS/m	1,2	(3)	< 0,75 > 3,0
RAS corregida (Relación Adsorción Sodio)		1,2		< 6,0 > 9,0
Sodio porcentual (Na)	%	20,3	35	
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	485		< 140 > 320
<b>Cationes y aniones (meq/l)</b>				
Calcio (Ca)	meq/l	7,0		
Magnesio (Mg)	meq/l	2,7		
Potasio (K)	meq/l	0,10		
Sodio (Na)	meq/l	2,5		< 3,0 > 9,0
Cloruro (Cl)	meq/l	3,4		< 4,0 > 10,0
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	meq/l	6,4		
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	meq/l	1,7		< 1,5 > 8,5
<b>Cationes y aniones (mg/l)</b>				
Calcio (Ca)	mg/l	140		
Magnesio (Mg)	mg/l	33		
Potasio (K)	mg/l	4		
Sodio (Na)	mg/l	58		< 70 > 200
Cloruro (Cl)	mg/l	121	200	< 140 > 350
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	mg/l	307	250	
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> )	mg/l	104		< 90 > 500
<b>Otras determinaciones</b>				
N-Amónico (NNH <sub>4</sub> )	mg/l	1,8		
N-Nítrico (NNO <sub>3</sub> )	mg/l	6,3		
Fósforo (P)	mg/l	0,06		
Boro (B)	mg/l	0,15	0,75	< 0,5 > 2,0
Cobre (Cu)	mg/l	0,04	0,20	0,20
Hierro (Fe)	mg/l	< 0,01	5,00	
Manganeso (Mn)	mg/l	< 0,01	0,20	0,20
Zinc (Zn)	mg/l	0,02	2,00	2,00

(1) Norma NCh1333.078 Modificada 1987. Requisitos de calidad del agua para diferentes Usos. Parte 6: Requisitos del agua para riego.

(2) Ministerio de Obras Públicas podrá autorizar valores mayores o menores para los límites máximos de cada elemento. En el caso de RAS, la autoridad competente debe establecerla en cada caso específico. Los elementos que figuran sin valor no se encuentran regulados en la norma.

(3) Clasificación del agua para riego según su salinidad de acuerdo a la norma NCh1333.  
N° Lab. 27035 : Agua que puede tener efectos perjudiciales en cultivos sensibles



Rosa Espinoza Astudillo  
Jefe Laboratorio

## Notas:

- Metodologías: pH, C. Eléctrica, Cl, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>: Potenciometría Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Zn, Cu, y otros metales: A. Atómica P, B, SO<sub>4</sub>: Colorimétrico HCO<sub>3</sub>: Volumetría
- Este informe no debe ser reproducido parcialmente sin la autorización por escrito del laboratorio.
- Los resultados son válidos sólo para las muestras analizadas las cuales fueron proporcionadas por el cliente

## APÉNDICES

## Apéndice I. Monitoreo diario sistemas NFT

## NFT N° 6

Día	Fecha	Temperatura Media °C	pH inicial	pH final	CE dS cm-1	Consumo diario L	Consumo Total L
1	24/08/13	10				1	1
2	25/08/13	7,5				1	2
3	26/08/13	9				2	4
4	27/08/13	12				2	6
5	28/08/13	16				2	8
6	29/08/13	11				1	9
7	30/08/13	8,5				1	10
8	31/08/13	14				2	12
9	01/09/13	12,5				2	14
10	02/09/13	11				2	16
11	03/09/13	15,5	7,3	5,8	2,6	3	19
12	04/09/13	14	7,1	5,8	2,6	4	23
13	05/09/13	13	6,6	5,8	2,7	4	27
14	06/09/13	15,5	6,0	5,7	2,6	5	32
15	07/09/13	16,5	5,8	5,8	2,7	5	37
16	08/09/13	19	5,8	5,8	2,6	6	43
17	09/09/13	18	5,9	5,8	2,6	7	50
18	10/09/13	17,5	5,9	5,9	2,6	8	58
19	11/09/13	14	6,0	6,0	2,6	7	65
20	12/09/13	11	5,9	5,9	2,5	9	74
21	13/09/13	7,5	5,8	5,8	2,6	9	83
22	14/09/13	8,5	5,9	5,9	2,5	10	93
23	15/09/13	9	6,0	6,0	2,5	11	104
24	16/09/13	6,5	5,9	5,7	2,5	8	112
25	17/09/13	7,5	6,0	6,0	2,5	12	124
26	18/09/13	10,5	6,1	5,8	2,4	13	137
27	19/09/13	12,5	6,0	6,0	2,5	15	152
28	20/09/13	12,5	6,0	6,0	2,5	14	166
29	21/09/13	7,5	5,8	5,8	2,4	14	180

(Continúa)

## Continuación NFT N° 6

Día	Fecha	Temperatura Media	pH inicial	pH final	CE	Consumo diario	Consumo Total
		°C			dS cm-1	L	L
30	22/09/13	10	5,8	5,8	2,4	16	196
31	23/09/13	15	6,0	6,0	2,4	20	216
32	24/09/13	15,5	6,2	5,8	2,4	22	238
33	25/09/13	13	6,2	5,8	2,4	23	261
34	26/09/13	8	5,9	5,9	2,4	25	286
35	27/09/13	11	5,9	5,9	2,4	27	313
36	28/09/13	9	6,1	6,1	2,5	26	339
37	29/09/13	11	6,2	5,8	2,6	27	366
38	30/09/13	9,5	6,1	6,1	3,1	30	396
39	01/10/13	13	5,8	5,8	3,4	33	429
40	02/10/13	12,5	5,7	5,7	3,7	34	<b>463</b>

## NFT N° 7

Día	Fecha	Temperatura Media	pH inicial	pH final	CE	Consumo diario	Consumo Total
		°C			dS cm-1	L	L
1	24/08/13	10				2	2
2	25/08/13	7,5				1	3
3	26/08/13	9				2	5
4	27/08/13	12				2	7
5	28/08/13	16				3	10
6	29/08/13	11				1	11
7	30/08/13	8,5				1	12
8	31/08/13	14				2	14
9	01/09/13	12,5				2	16
10	02/09/13	11				3	19
11	03/09/13	15,5	7,3	5,8	2,6	3	22
12	04/09/13	14	7,3	5,8	1,8	3	25
13	05/09/13	13	6,5	5,8	2,2	4	29
14	06/09/13	15,5	6,0	6,0	3,1	5	34
15	07/09/13	16,5	5,8	5,8	2,9	6	40
16	08/09/13	19	5,9	5,9	3,0	8	48
17	09/09/13	18	5,9	5,9	3,0	7	55
18	10/09/13	17,5	5,8	5,8	2,8	10	65
19	11/09/13	14	5,9	5,9	2,8	8	73

(Continúa)

## Continuación NFT N° 7

Día	Fecha	Temperatura Media	pH inicial	pH final	CE	Consumo diario	Consumo Total
		°C			dS cm-1	L	L
20	12/09/13	11	5,9	5,9	2,8	8	81
21	13/09/13	7,5	6,0	6,0	2,7	10	91
22	14/09/13	8,5	6,1	6,1	2,6	9	100
23	15/09/13	9	6,1	6,1	2,6	9	109
24	16/09/13	6,5	6,0	6,0	2,4	8	117
25	17/09/13	7,5	6,0	6,0	2,5	10	127
26	18/09/13	10,5	5,9	5,9	2,4	12	139
27	19/09/13	12,5	5,9	5,9	2,4	17	156
28	20/09/13	12,5	5,8	5,8	2,4	14	170
29	21/09/13	7,5	6,0	6,0	2,5	11	181
30	22/09/13	10	5,8	5,8	2,5	19	200
31	23/09/13	15	6,0	6,0	2,4	23	223
32	24/09/13	15,5	6,1	6,1	2,4	24	247
33	25/09/13	13	6,0	6,0	2,4	26	273
34	26/09/13	8	6,0	6,0	2,4	28	301
35	27/09/13	11	6,1	6,1	2,4	25	326
36	28/09/13	9	6,0	6,0	2,6	27	353
37	29/09/13	11	6,3	5,8	2,8	28	381
38	30/09/13	9,5	6,1	6,1	3,0	31	412
39	01/10/13	13	6,0	6,0	3,2	32	444
40	02/10/13	12,5	5,9	5,9	3,6	34	<b>478</b>

## NFT N° 8

Día	Fecha	Temperatura Media	pH inicial	pH final	CE	Consumo diario	Consumo Total
		°C			dS cm-1	L	L
1	24/08/13	10				2	2
2	25/08/13	7,5				1	3
3	26/08/13	9				2	5
4	27/08/13	12				2	7
5	28/08/13	16				3	10
6	29/08/13	11				1	11
7	30/08/13	8,5				1	12
8	31/08/13	14				2	14
9	01/09/13	12,5				2	16
10	02/09/13	11				3	19

(Continúa)

## Continuación NFT N° 8

Día	Fecha	Temperatura Media	pH inicial	pH final	CE dS cm-1	Consumo diario	Consumo Total
		°C				L	L
11	03/09/13	15,5	7,3	5,8	2,6	3	22
12	04/09/13	14	7,3	5,8	1,8	3	25
13	05/09/13	13	6,5	5,8	2,2	4	29
14	06/09/13	15,5	6,0	6,0	3,1	5	34
15	07/09/13	16,5	5,8	5,8	2,9	6	40
16	08/09/13	19	5,9	5,9	3,0	8	48
17	09/09/13	18	5,9	5,9	3,0	7	55
18	10/09/13	17,5	5,8	5,8	2,8	10	65
19	11/09/13	14	5,9	5,9	2,8	8	73
20	12/09/13	11	5,9	5,9	2,8	8	81
21	13/09/13	7,5	6,0	6,0	2,7	10	91
22	14/09/13	8,5	6,1	6,1	2,6	9	100
23	15/09/13	9	6,1	6,1	2,6	9	109
24	16/09/13	6,5	6,0	6,0	2,4	8	117
25	17/09/13	7,5	6,0	6,0	2,5	10	127
26	18/09/13	10,5	5,9	5,9	2,4	12	139
27	19/09/13	12,5	5,9	5,9	2,4	17	156
28	20/09/13	12,5	5,8	5,8	2,4	14	170
29	21/09/13	7,5	6,0	6,0	2,5	11	181
30	22/09/13	10	5,8	5,8	2,5	19	200
31	23/09/13	15	6,0	6,0	2,4	23	223
32	24/09/13	15,5	6,1	6,1	2,4	24	247
33	25/09/13	13	6,0	6,0	2,4	26	273
34	26/09/13	8	6,0	6,0	2,4	28	301
35	27/09/13	11	6,1	6,1	2,4	25	326
36	28/09/13	9	6,0	6,0	2,6	27	353
37	29/09/13	11	6,3	5,8	2,8	28	381
38	30/09/13	9,5	6,1	6,1	3,0	31	412
39	01/10/13	13	6,0	6,0	3,2	32	444
40	02/10/13	12,5	5,9	5,9	3,6	34	<b>478</b>

## Apéndice II. Huella gris norma NCh1333

Parámetros considerados bajo norma NCh1333.

Parámetro	Unidad	NFT 6	NFT 7	NFT 8	Límites permitidos Norma NCh1333
pH		5,7	5,9	3,8	5,5 - 9,0
CE	dS m-1	3,7	3,6	3,7	-
RAS		0,3	0,3	0,3	-
Na%	%	6,74	7,37	6,91	35
Cl-	mg L-1	131,17	152,44	124,08	200
SO4-2	mg L-1	100	131,25	187,5	250
Cu	mg L-1	0,1	0,12	0,11	0,20
Mn	mg L-1	0,25	0,18	0,23	0,20
Zn	mg L-1	0,18	0,09	0,16	2,00
Fe	mg L-1	0,5	0,7	0,5	5,00

Para el cálculo de la huella gris se utilizó la ecuación 8, en donde  $C_{sol}$  es el contenido del elemento en  $mg L^{-1}$ ,  $C_{max}$  es el límite máximo permitido por la norma en  $mg L^{-1}$ ,  $V_{sol}$  es el volumen de solución nutritiva de cada estanque, correspondiente a  $0,16 m^3$ , y el factor  $y$  es la masa de producto obtenido en cada sistema, expresado en toneladas.

$$WF_{gris} = \frac{\left(\frac{C_{sol}}{C_{max}} - 1\right) \times V_{sol}}{y} [Volumen/masa]$$

Ecuación 8: Cálculo huella gris, propuesta metodológica

Estimación de la huella gris según límites establecidos en Norma NCh1333 de calidad de agua para riego.

	$V_{sol}$ $m^3$	$y$ ton	Mn $m^3 ton^{-1}$	H gris $m^3 ton^{-1}$
NFT 6	0,16	0,0273	1,47	1,47
NFT 7	0,16	0,0266	0,00	0,00
NFT 8	0,16	0,0235	1,02	1,02
Promedio				0,83

Según el cálculo, la huella gris promedio del cultivo bajo la norma NCh1333 es de  $0,83 m^3 ton^{-1}$ .

### Apéndice III. Huella gris norma NCh409/1

Parámetros considerados bajo norma NCh409/1					
Parámetro	Unidad	NFT 6	NFT 7	NFT 8	Límites permitidos norma NCh409/1
pH		5,7	5,9	3,8	6,5-8,5
CE	dS m <sup>-1</sup>	3,7	3,6	3,7	-
RAS		0,3	0,3	0,3	-
Na%	%	6,74	7,37	6,91	35
Nitrato	mg L <sup>-1</sup>	108,64	123,13	131,47	50
Cl <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	131,17	152,44	124,08	200
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	mg L <sup>-1</sup>	100	131,25	187,5	250
Cu	mg L <sup>-1</sup>	0,1	0,12	0,11	0,20
Mn	mg L <sup>-1</sup>	0,25	0,18	0,23	0,10
Zn	mg L <sup>-1</sup>	0,18	0,09	0,16	2,00
Fe	mg L <sup>-1</sup>	0,5	0,7	0,5	0,30

La huella gris se calculó según la misma ecuación utilizada para la norma NCh1333. Según el cálculo, la huella gris promedio del cultivo bajo la norma NCh409/1 sería de 21,90 m<sup>3</sup>·ton<sup>-1</sup> (apéndice II).

Al comparar este resultado con la huella obtenida bajo la norma NCh1333 (promedio 0,83 m<sup>3</sup>·ton<sup>-1</sup>), la huella gris aumenta en 26,39 veces su valor.

Estimación de la huella gris según límites establecidos en Norma NCh409/1 de calidad de agua potable

	$V_{sol}$ m <sup>3</sup>	$y$ ton	Nitrato m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup>	Mn m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup>	Fe m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup>	H gris m <sup>3</sup> ton <sup>-1</sup>
NFT 6	0,16	0,0273	6,87	8,79	3,91	19,57
NFT 7	0,16	0,0266	8,80	4,81	8,02	21,63
NFT 8	0,16	0,0235	11,09	8,85	4,54	24,48
Promedio						21,90