



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
AMBIENTAL- AGUA

DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS POR LAS CARGAS DE
NITRÓGENO Y FÓSFORO EN UN CUERPO DE AGUA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MARÍA TERESA RIVAS VALDÉS.

TUTOR PRINCIPAL
DRA. ANNE M. HANSEN, FACULTAD DE INGENIERÍA CAMPUS MORELOS

COMITÉ TUTOR
DR. PEDRO MARTÍNEZ PEREDA, FACULTAD DE INGENIERÍA
DRA. PATRICIA LEONOR GÜERECÁ HERNÁNDEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. OCTUBRE 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Pedro Martínez Pereda

Secretario: M.I. Inés Navarro González

1° Vocal: Dr. Enrique César Valdez

2° Vocal: Dra. Anne M. Hansen Hansen

3° Vocal: Dra. Patricia Leonor Güereca Hernández

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA, CAMPUS MORELOS

TUTOR DE TESIS:

Dra. Anne Hansen Hansen

FIRMA

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi mamá y hermana que me apoyaron y tuvieron paciencia en esta trayectoria.

AGRADECIMIENTOS

- ✘ La presente tesis se realizó gracias al apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) mediante la beca No. 488520.
- ✘ Quiero agradecer a la Dra. Anne M. Hansen que como directora de tesis me oriento y dedicó tiempo constante para mi formación académica durante el desarrollo de este trabajo. A la Dra. Patricia Güereca Hernández y al Dr. Pedro Martínez Pereda por sus valiosos comentarios y recomendaciones
- ✘ A Cesar por todo su apoyo que fue fundamental. Este proyecto no fue fácil pero nunca dejaste de motivarme y mostrar tu amor aún en la distancia.
- ✘ A mis tíos Memo y Susy por todos sus consejos y alientos, así como por ofrecerme un hogar durante mi estancia en su casa.
- ✘ A todos mis profesores que con su experiencia y conocimientos transmitidos me apoyaron a desarrollar este trabajo.
- ✘ A los investigadores Dra. Carole Farell de la Universidad Autónoma de México y Dr. Diego Arévalo Uribe, Consultor Especialista en Gestión del Agua y Huella Hídrica WWF Colombia, que con sus trabajos de investigación y sus comentarios acertados me orientaron a comprender conceptos fundamentales de esta tesis.
- ✘ Al Dr. Pedro Padral, Biol. Marco Mijangos, M.I. Carlos Corzo que compartieron información relevante para el procesado de mis resultados.
- ✘ A todos aquellos amigos y colegas que me apoyaron durante la elaboración de esta tesis. Su apoyo fue y sigue siendo muy importante para mi

Resumen

El crecimiento de la población tiene como consecuencia un incremento de consumo de agua en la producción de bienes y servicios por tanto un mayor volumen de descargas de agua residual que contienen cargas de nitrógeno y fósforo. Cuando estos nutrientes se acumulan en los ecosistemas acuáticos inducen la condición eutrófica, cuya característica principal es la proliferación excesiva de algas, lo cual es desfavorable tanto para la biota acuática como para el uso del agua.

En la cuenca del Río Verde, localizada al occidente de México, se construirá la presa *Purgatorio* para abastecer de agua potable a la población de la Zona Conurbada de Guadalajara. Esta cuenca recibe cargas continuas de nitrógeno y fósforo ocasionando condiciones eutróficas y que la calidad de agua del Río Verde no sea la adecuada tratándose de una fuente de abastecimiento de agua para consumo humano.

El objetivo de la presente investigación fue determinar la huella hídrica gris (HHG) por las cargas antropogénicas de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) en la cuenca hidrológica del Río Verde, siendo HHG un indicador que define el volumen de agua necesario para asimilar las cargas de estos nutrientes hasta alcanzar concentraciones inferiores a los límites establecidos. En este trabajo, los límites fueron aquellos que definen el estado mesotrófico. La capacidad del cuerpo receptor para asimilar las cargas se define como la diferencia de las concentraciones límite (C_{max}) y las que se presentarían en ausencia de actividades humanas (C_{nat}). Debido a la carencia de información de C_{nat} para NT y PT en la zona de estudio, se propuso y se aplicó un método para estimarlas. Las C_{nat} obtenidas en la cuenca del Río Verde son 94 mg/L para NT y 17 mg/L para PT.

A partir del inventario de fuentes de contaminantes realizado por Corzo (2009), complementado con información de descargas adicionales de industrias y corrigiendo la estimación de descargas pecuarias, se determinaron las HHG en la cuenca del Río Verde de 109 072 Mm³/año para NT y de 1 123 128 Mm³/año para PT. Se analizaron las HHG por las descargas de agua residual municipal con y sin tratamiento, industrial, pecuaria y de diferentes usos de suelo, encontrando que la actividad pecuaria representa más del 90% de las HHG. También se analizaron las HHG por subregiones dentro de la cuenca hidrológica:

Determinación de la huella hídrica gris por las cargas de nitrógeno y fósforo en un cuerpo de agua

Región Jalisco (superficie de la cuenca del Río Verde que pertenece al estado de Jalisco) y Cuenca Zapotillo-Purgatorio (superficie de la cuenca correspondiente al tramo entre las futuras presas *El Zapotillo* y *Purgatorio*). La evaluación de las HHG por estas subregiones indica que la retención de nutrientes en la presa *El Zapotillo*, no será suficiente para aminorar las condiciones eutróficas en la presa *Purgatorio*.

Para evaluar los efectos de reducción de descargas de nutrientes, se formularon 10 diferentes escenarios en donde se observó que para disminuir la HHG por NT es necesario reducir más del 50% de las descargas pecuarias; no obstante, para la reducción de la HHG por PT, es necesario aplicar acciones de reducción en las otras fuentes de nutrientes.

Se concluye que el Río Verde no cuenta con el volumen de agua necesario para asimilar las cargas de NT y PT. Para disminuir las HHG a niveles aceptables, se deben tomar acciones que reduzcan las cargas de nutrientes en toda la cuenca del Río Verde para que el río no continúe presentando condiciones eutróficas.

Palabras clave: Cuenca del Río Verde, presa Purgatorio, presa El Zapotillo, huella hídrica gris, nitrógeno, fósforo, concentración natural, retención de nutrientes, eutroficación.

Abstract

The population growth had caused the increase of water consumption for the production of goods and services; therefore there are more wastewater discharges with nitrogen and phosphorus loads. When these nutrients accumulate in aquatic ecosystems the eutrophic condition appear, which main characteristic is the excessive growth of algae that is unfavorable for aquatic biota and water consumption.

In the Río Verde basin, located in west of Mexico, the dam Purgatorio will be built to supply drinking water to the population of metropolitan area of Guadalajara. This basin receives continuous loads of nitrogen and phosphorus causing eutrophic conditions on Río Verde, and poor water quality for consumption.

The aim of this investigation was to determine the grey water footprint (GWF) related to anthropogenic loads of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in Río Verde basin. The GWF is an indicator that defines the volume of freshwater that is required to assimilate these nutrients based on existing ambient water quality standard. In this study, the standards used were the limit concentrations that define mesotrophic state. The assimilation capacity of the receiving water body depends on the difference between the limit concentrations (C_{max}) and concentrations that would present if there were no human activities (C_{nat}). Because of the lack of information on C_{nat} of TN and PT in the study area, a method was proposed and applied to estimate them. The C_{nat} in the Río Verde basin was 94 mg/L for NT and 17 mg/L for PT.

From contaminant source inventory carry out by Corzo (2009) complemented with additional information of industries discharges, and correcting the previous estimated livestock discharges, the GWF determined in the Río Verde basin were 109 072 Mm³/year for NT and 1 123 128 Mm³/year for PT. The GWF assessment was carried out for discharges from municipal water with and without treatment, industrial, livestock and different land uses. The results show that livestock farming was the largest water polluted; accounting over 90% of total GWF. Also the GWF assessment was by subregion: Jalisco Region (surface of the Río Verde basin belongs to state of Jalisco) and Zapotillo-Purgatorio Basin (the corresponding part of the basin to the section between the future dams *Purgatorio* and *El Zapotillo*). The

Determinación de la huella hídrica gris por las cargas de nitrógeno y fósforo en un cuerpo de agua

GWF assessment by geographic regions indicates that the retention of nutrients in *El Zapotillo* not be enough to mitigate the eutrophic conditions in dam Purgatorio.

Ten different scenarios were formulated to evaluate the effects of reducing nutrient discharges. The results show that for reducing GWF for NT its necessary reduced livestock discharges to more than 50%; however the reduction of GWF for PT is necessary to apply reduction actions in the other nutrient sources.

We conclude that the Río Verde river does not have the volume of water to assimilate loads of TN and TP. To reduce the GWF to acceptable levels must be taken actions to reduce nutrient loads across the Río Verde basin for control eutrophic conditions on the river.

Keywords: Río Verde Basin, Purgatorio dam, El Zapotillo dam, grey water footprint, nitrogen, phosphorus, background concentration, retention of nutrients, eutrophication.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. HIPÓTESIS.....	3
1.4. OBJETIVO	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. NUTRIENTES EN UN SISTEMA ACUÁTICO	5
2.2. FUENTES DE CONTAMINACIÓN POR NUTRIENTES EN SISTEMAS ACUÁTICOS	8
2.3. EUTROFICACIÓN.....	11
2.4. HUELLA HÍDRICA	14
2.4.1. <i>Huella hídrica y análisis de ciclo de vida</i>	19
2.4.2. <i>Huella hídrica gris</i>	22
2.5. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO VERDE.....	27
3. METODOLOGÍA.....	31
3.1. DELIMITACIÓN DE LAS REGIONES DE ESTUDIO.....	31
3.2. APLICACIÓN Y COMPLEMENTO DEL INVENTARIO DE NUTRIENTES DESARROLLADO POR CORZO (2009)	33
3.2.1. <i>Aplicación del inventario en las tres regiones estudiadas</i>	33
3.2.2. <i>Recalculo de las cargas de nutrientes por ganado bovino y porcino</i>	35
3.2.3. <i>Inclusión de descargas de agua residual industrial al inventario de cargas de nutrientes</i>	38
3.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES NATURALES DE NT Y PT	38
3.4. DETERMINACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS	42
3.5. FORMULACIÓN DE ESCENARIOS DE REDUCCIÓN DE HUELLA HÍDRICA GRIS	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1. INVENTARIO DE CARGAS DE NITRÓGENO Y FÓSFORO	45
4.2. CONCENTRACIÓN NATURAL DE NT Y PT.....	49
4.3. EVALUACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS (HHG)	50
4.3.1. <i>HHG por fuentes de nutrientes</i>	50
4.3.2. <i>HHG por división política a nivel municipal</i>	57
4.4. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE REDUCCIÓN DE HHG	61
5. CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA	67
I. ANEXO	76

Determinación de la huella hídrica gris por las cargas de nitrógeno y fósforo en un cuerpo de agua

ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE NT Y PT SOBRE LA CORRIENTE DEL RÍO VERDE EN LA REGIÓN CUENCA ZAPOTILLO-PURGATORIO	76
II. ANEXO	79
ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE NT Y PT GENERADAS EN LA GANADERÍA BOVINA.....	79
III. ANEXO	82
RETENCIÓN DE NUTRIENTES EN LA PRESA EL ZAPOTILLO	82

Índice de tablas

<i>Tabla 2.1. Clasificación de fuentes de contaminación puntual y difusa en una cuenca hidrológica (Carpenter, et al., 1998).</i>	10
<i>Tabla 2.2. Comparación de concentraciones límite de NT y PT para diferentes estados tróficos en lagos de zonas templadas y tropicales.</i>	14
<i>Tabla 2.3. Municipios incluidos en la cuenca del Río Verde.</i>	28
<i>Tabla 3.1. Descripción de las regiones de estudio</i>	32
<i>Tabla 3.2. Cantidad de nutrientes defecados por el ganado bovino conforme a su peso</i>	37
<i>Tabla 3.3. Concentraciones de nutrientes en escurrimientos de bosque y matorral.</i>	41
<i>Tabla 3.4. Escenarios de reducción de HHG por NT y PT por región de estudio y disminución de las cargas pecuarias en 50% y 77%</i>	44
<i>Tabla 4.1. Cargas de NT y PT, en la Cuenca del Río Verde, por fuente de nutriente considerando la retención en la presa El Zapotillo.</i>	46
<i>Tabla 4.2. Cargas de NT y PT por municipios en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco</i>	48
<i>Tabla 4.3. Comparación de las C_{nat} obtenidas en cada región de estudio con las $C_{máx}$.</i>	49
<i>Tabla 4.4. HHG por NT y PT por fuente de contaminación en la región Cuenca del Río Verde.</i>	51
<i>Tabla 4.5. HHG de la actividad pecuaria por tipo de ganado en la cuenca del Río Verde</i>	52
<i>Tabla 4.6. HHG por NT y PT por uso de suelo en la cuenca del Río Verde</i>	55
<i>Tabla 4.7. HHG de las partes de los municipios que se encuentran dentro de las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco.</i>	58
<i>Tabla 4.8 HHG/HHG_{permisible} por NT 50% y 77% de reducción pecuaria</i>	62
<i>Tabla 4.9. HHG/HHG_{permisible} por NT a) 50% de reducción, b) 77% de reducción.</i>	63
<i>Tabla II.1. Concentraciones de nutrientes en excretas bovinas. Recopilado por Corzo (2009)</i>	79
<i>Tabla II.2. Ecuaciones para estimar la concentración de nutrientes con respecto al peso del animal</i>	80
<i>Tabla III.1 Concentración de N y P de la presa Valle de Bravo.</i>	82

Índice de Figuras

<i>Figura 2.1. Fases para la evaluación de la huella hídrica. Elaboración propia con base en el “Manual de evaluación de la huella hídrica” (Hoekstra, et al., 2011)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.2. Ubicación geográfica de la Cuenca del Río Verde.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 3.1. Delimitación de las tres regiones estudiadas</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.2. Cobertura de usos de suelo y vegetación delimitada por Polígonos de Thiessen en las regiones de estudio</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.3. Curva de crecimiento de ganado porcino. Elaborado con información proporcionada por Padral (2013)</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.4. Curva de crecimiento de ganado bovino de raza Holstein y Pardo Suizo. Elaborado con información de Gasque (2008).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.5. Extrapolación de cobertura de áreas de bosque y matorral en función de la precipitación media anual (PMA).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.1. Municipios de la Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.2. HHG por NT y PT por fuente de nutriente y volumen de agua disponible entre las presas El Zapotillo y Purgatorio en comparación con el volumen de agua disponible</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.3. HHG por NT de la actividad pecuaria (102 119 Mm³/año) por tipo de ganado en la cuenca del Río Verde</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.4. HHG por PT de la actividad pecuaria (1 082 930 Mm³/año) por tipo de ganado en la cuenca del Río Verde</i>	<i>54</i>
<i>Figura 4.5. HHG por NT por uso de suelo (1 376 Mm³/año) en la cuenca del Río Verde</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.6. HHG por PT por uso de suelo (6 040 Mm³/año) en la cuenca del Río Verde.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.7. HHG por NT en los municipios que se encuentran en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.8. HHG por PT en los municipios que se encuentran en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.9. Relación HHG/HHG_{permisible} por NT con 50% y 77% de reducción de actividad pecuaria: 1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio, 2. Región Jalisco, 3. Cuenca del Río Verde, 3.i. Cuenca del Río Verde con atenuación y 3.i.i. Cuenca del Río Verde con atenuación y retención en presa El Zapotillo</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.10. Relación HHG/HHG_{permisible} por PT con 50% y 77% de reducción de actividad pecuaria 1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio, 2. Región Jalisco, 3 Cuenca del Río Verde, 3.i. Cuenca del Río Verde con atenuación y 3.i.i. Cuenca del Río Verde con atenuación y retención en presa El Zapotillo</i>	<i>64</i>
<i>Figura I.1. Ubicación de los sitios de muestreo.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura I.2. Tendencia aguas arriba hacia aguas abajo de las concentraciones de nitrógeno total sobre la corriente del Río Verde</i>	<i>77</i>
<i>Figura I.3. Tendencia aguas arriba hacia aguas abajo de las concentraciones de fósforo total sobre la corriente del Río Verde.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura II.1. Correlación de concentración de nutrientes en función del peso de bovino de leche.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura II.2. Correlación de concentración de nutrientes en función del peso de bovino de carne</i>	<i>81</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Las actividades antrópicas (agricultura, ganadería, deforestación, industrialización, etc.) efectuadas dentro de una cuenca hidrológica modifican los ecosistemas y al no tener control sobre ellas ocasionan diversos impactos ambientales. Dichas actividades descargan continuamente residuos con contenido de nitrógeno y fósforo ocasionando que estos nutrientes se acumulen en los cuerpos de agua receptores (Seitzinger, et al., 2010). A pesar de que dichos nutrientes son necesarios para el desarrollo de la biota acuática, una cantidad en exceso acelera el proceso de eutroficación, el cual es evidente en el aumento de la producción de biomasa, disminución de la diversidad de las especies, alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en el bentos, impedimento del paso de la luz por la densa presencia de algas y vegetación acuática, entre otros factores (Roldán & Ramírez, 2008). Por esta razón es primordial tener un control sobre las descargas con contenido de nutrientes, antes de que generen un problema ambiental.

La cuenca del Río Verde será una importante fuente de abastecimiento de agua para los estados de Jalisco, Aguascalientes, Guanajuato y Zacatecas. Actualmente, el agua de la región está destinada al desarrollo de diversos sectores económicos de los cuales destaca la actividad agropecuaria. Dichos sectores introducen nitrógeno y fósforo a los cuerpos de agua a través de sus descargas de agua residual sin tratamiento ocasionando que la calidad del agua se deteriore. La Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA) ha caracterizado la calidad del agua del Río Verde y ha realizado saneamiento debido al proyecto de construcción de la presa derivadora *Purgatorio*, localizada aguas abajo de la futura presa *El Zapotillo*, la cual se empleará para el servicio de abastecimiento de agua potable a la Zona Conurbada de Guadalajara (ZCG).

Para generar información que permita mantener, preservar, etc., la calidad del agua en la presa *Purgatorio*, la CEA programó campañas de muestreo para cuantificar los

contaminantes en agua y sedimento del Río Verde (AYMA, 2011). Por otra parte, en el análisis de los inventarios de fuentes de contaminación por nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) realizados para esta región se concluyó que la actividad de mayor aporte de nutrientes es la actividad pecuaria (Corzo, 2009). Aunado a lo anterior, el transformar el cauce del río de un sistema lótico a léntico tiene como consecuencia que el NT y PT se acumulen lo cual acelerará el proceso de eutroficación.

En esta tesis se propone utilizar la huella hídrica gris (HHG) como una herramienta que ayude a comprender la contaminación del agua debida al NT y PT en términos de volúmenes anuales requeridos para asimilar estos nutrientes. La HHG es un indicador del grado de contaminación del agua dulce y se define como el volumen de agua necesario para asimilar la carga de contaminantes (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Existen tres principales ventajas de utilizar esta herramienta: la primera es que se puede visualizar fácilmente cuando los volúmenes de agua contaminados rebasan los estándares de calidad máximos permisibles, la segunda es que es fácil detectar la actividad antropogénica o fuente de contaminación de mayor repercusión sobre los ecosistemas acuáticos y la tercera es que se distingue el impacto causado por cada contaminante.

A diferencia de las medidas convencionales para cuantificar los contaminantes (masa/volumen o masa/tiempo) que se comparan con los estándares máximos permisibles, la HHG (volumen/tiempo) refleja directamente la capacidad del sistema acuático para soportar o no las cargas residuales, independientemente si se cumplen con los estándares.

1.2. Justificación

En la cuenca del Río Verde se han realizado estudios para determinar la calidad del agua (AYMA, 2006; AYMA, 2011) cuyos resultados muestran que las actividades antropogénicas dentro de la cuenca liberan residuos con contenido de nitrógeno y fósforo lo cual acelera el proceso de eutroficación. Sin embargo, las metodologías utilizadas no han permitido visualizar la cantidad aceptable de descarga de nutrientes para que los cuerpos de agua receptores puedan asimilarlos.

La presente investigación utiliza el concepto de huella hídrica gris (HHG) con el fin de conocer los volúmenes de agua anuales que se requieren en el tramo del Río Verde entre las presas *El Zapotillo* y *Purgatorio* para asimilar las cargas de NT y PT, en la cuenca del Río Verde. Esto es factible debido a que el cálculo de la HHG involucra la concentración máxima permisible para el estado mesotrófico, lo cual indica que al exceder la capacidad del tramo del Río Verde para asimilar dichos nutrientes la condición de la presa *Purgatorio* será eutrófica desde sus inicios.

La investigación consistió en evaluar las HHG por NT y por P de fuentes de nutrientes difusas y puntuales tanto en la cuenca hidrológica del Río Verde como en las dos subregiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco. La HHG total de la cuenca corresponde a la suma de aquellas evaluadas para las distintas fuentes de nutrientes que descargan dentro de la zona. La evaluación de la HHG sobre la cuenca del Río Verde, permite visualizar aquellas fuentes que requieren disminuir su carga de nutrientes mediante la mejora del aprovechamiento del recurso hídrico, de esta manera se podrá aminorar la cantidad de nutrientes sobre el tramo del río entre las presas *El Zapotillo* y *Purgatorio*.

A pesar de que existen diversos estudios de huella hídrica enfocados a una cuenca hidrológica, algunos de ellos se encuentran con la dificultad de evaluar la HHG (Samoral, et al., 2011; Zeng, et al., 2012). De entre las dificultades para evaluar la HHG se encuentra la falta de datos de concentraciones naturales necesarias para su cálculo. En esta tesis para la determinación de la HHG por NT y PT en una cuenca hidrológica, se propone un método para estimar las concentraciones naturales de NT y de PT.

1.3. Hipótesis

Con las concentraciones naturales de nutrientes se pueden alcanzar los límites máximos para el estado mesotrófico en el agua.

Predominan las HHG debido a las descargas de fuentes difusas.

Mediante la reducción de descargas de nutrientes, se puede reducir la HHG a volúmenes aceptables, lo cual permite controlar la eutroficación en la presa *Purgatorio*.

1.4. Objetivo

Determinar la huella hídrica gris por las cargas de NT y PT en la cuenca hidrológica del Río Verde.

Para lograr el objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- a) Complementar y analizar el inventario de fuentes contaminantes de NT y PT del Río Verde realizado por Corzo (2009)
- b) Determinar la concentración natural (fondo) de NT y PT en la zona de estudio.
- c) Determinar la HHG por zonas geográficas, y actividades socioeconómicas.
- d) Proponer y evaluar escenarios de reducción de la HHG.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen los conceptos que fundamentan el presente trabajo. En principio, se describe el aporte natural de nitrógeno y fósforo en un sistema acuático y sus transformaciones fisicoquímicas debidas a la interacción que tiene con la vida acuática. Posteriormente, se describen las principales fuentes de nutrientes considerando el fenómeno de eutroficación, para explicar los efectos ocasionados al incrementar el aporte de nutrientes en los cuerpos de agua. Posteriormente, se define la HH y su componente gris, que es la herramienta utilizada en este trabajo para evaluar los volúmenes de agua contaminados con NT y PT asociados a las actividades humanas dentro de una cuenca hidrológica. Por último, se describe la cuenca del Río Verde, que es la zona de estudio del presente trabajo de investigación

2.1. Nutrientes en un sistema acuático

Se llama nutriente a un elemento químico necesario para la vida de un organismo. Los elementos más importantes para la productividad primaria en los ecosistemas acuáticos son el nitrógeno (N) y el fósforo (P), ya que sus especies iónicas suelen ser los factores limitantes en la producción primaria (Roldán & Ramírez, 2008).

El mantenimiento de los ecosistemas acuáticos depende de un adecuado balance entre los nutrientes que entran al sistema y los aprovechados por la flora y fauna. Para lograr el equilibrio de dicho balance, se lleva a cabo el ciclo de nutrientes mediante una serie de pasos interconectados, de tal manera que cada proceso es un precursor del anterior. El ciclo de nutrientes se fundamenta principalmente en la entrada al sistema (fijación biológica, aportes atmosféricos, etc.), el intercambio entre plantas, animales y el suelo (cadena trófica), así como en las salidas del ecosistema (lixiviación, escorrentía, emisión de gases, transformación de la biota, etc.). Cada nutriente fluye a través del ciclo de manera diferente (Bosco, et al., 2004). En los siguientes párrafos se describe el papel que el N y el P desempeñan dentro de los ecosistemas acuáticos.

La importancia del N en la biota acuática, consiste en que es el componente fundamental de las proteínas (cadenas de aminoácidos), las cuales constituyen la base estructural de los seres vivos (Bitton, 2005). Varios autores (Ryding & Rast, 1989; Manahan, 2007; Moore, et al., 2008; Sawyer, et al., 2001) coinciden en que la principal entrada de N al ecosistema acuático ocurre a través de la fijación del nitrógeno molecular (N_2) proveniente de la atmósfera, ya que se le considera como la fuente primaria de todas las especies nitrogenadas pero debido a su fuerte enlace $N\equiv N$ no puede ser asimilado por las plantas como nutriente. Las cianobacterias y algunas clases de bacterias son conocidas como fijadoras de nitrógeno, ya que son capaces de sintetizar nitrógeno amoniacal (NH_4) a partir del N_2 (Manahan, 2007). Los nitratos provenientes de la oxidación del NH_4 son los nutrientes de las plantas. En general, en un cuerpo de agua, las reacciones de oxidación y reducción de los compuestos nitrogenados se asocian a la asimilación fotosintética y a su utilización por algas y las plantas acuáticas (Wetzel, 2001), aunque existen otros mecanismos de transformación del N.

Desde el punto de vista químico, el N cuenta con diferentes estados de oxidación que unidos a otros elementos forman diversos compuestos. En los sistemas acuáticos, es común encontrar la unión del N con el oxígeno e hidrógeno, siendo siete compuestos nitrogenados predominantes:

- Nitrógeno molecular- N_2 , fijación por bacterias
- Amoniacal- NH_3 , principal componente de proteínas
- Amonio- NH_4^+ , relacionado con la urea
- Óxido nitroso- N_2O , liberación del nitrógeno a la atmósfera por acción bacteriana
- Nitrito- NO_2^{2-} , nitrificación por *Nitrosomas*
- Nitrato- NO_3^- , nitrificación por *Nitrobacter*
- Nitrógeno orgánico disuelto- Péptidos, purinas, aminas, aminoácidos, asociado a la materia orgánica

El nitrógeno total (NT) incluye a todas las especies de nitrógeno, es decir, la suma de los óxidos de nitrógeno (NO_x) con el nitrógeno amoniacal (NH_x) y el nitrógeno orgánico.

A pesar de que, en un ecosistema acuático, existe una variedad de especies nitrogenadas, los niveles de concentración de NT son inferiores a 1 mg/L, siempre y cuando no haya aportes antropogénicos (Weiner, 2008). Las concentraciones de nitrógeno disuelto están en un intervalo entre 120 $\mu\text{g/L}$ y 260 $\mu\text{g/L}$ (Meybeck, 1982). Estas concentraciones no incluyen los aportes provenientes de las actividades antropogénicas y es posible que los valores cambien con el tiempo debido a que los ríos son sistemas dinámicos que constantemente transportan nutrientes.

Por otra parte, el fósforo (P) es un nutriente esencial para la vida ya que forma parte de las moléculas tales como, membranas celulares (fosfolípidos), el ATP (trifosfato de adenosina), que es la energía para los procesos biológicos a nivel celular, los ácidos nucleicos ADN y ARN los cuales contienen los genes hereditarios y son codificadores en la síntesis de proteínas (Bitton, 2005). Es común que las rocas ígneas, minerales, así como sedimentos estén conformados por compuestos de fósforo inorgánico, tal es el caso de la hidroxiapatita $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3]$, una sal de calcio, cuyos depósitos constituyen la mayor reserva de fosfato, o la fosfina (PH_3), la cual se encuentra en pantanos. Sin embargo, estos compuestos son pocos solubles, por ende su abundancia en los ecosistemas acuáticos es menor comparada con los compuestos nitrogenados.

Mediante los procesos de oxidación-reducción llevados a cabo en el suelo así como la disolución de los minerales por acción del ácido carbónico en las lluvias, el P inorgánico es transportado a través de las escorrentías. Una vez introducido a los cuerpos de agua, las enzimas de los microorganismos intervienen para transformarlo a fosfato siendo un nutriente disuelto que puede ser aprovechado por las plantas. Las concentraciones de fosfato disueltos están generalmente en un rango de 10 a 100 $\mu\text{g/L}$ y raramente exceden los 200 $\mu\text{g/L}$ (Weiner, 2008). Estas concentraciones se ven afectadas constantemente por las actividades antropogénicas.

La característica química del P es que no existen compuestos fosfatados gaseosos que sean liberados a la atmósfera, por lo tanto, todas sus reacciones se llevan a cabo únicamente en la litosfera. Las formas usuales del fósforo en solución acuosa incluyen los ortofosfatos, polifosfatos y fosfato orgánico, este último se forma cuando los fosfatos se

asocian al carbono en forma de tejido animal o vegetal (Bitton, 2005). Las formas de ortofosfatos (PO_4) y polifosfatos (P_xO_x) más comunes son las siguientes:

- Fosfato trisódico- Na_3PO_4 ,
- Fosfato disódico- Na_2HPO_4 ,
- Fosfato monosódico- NaH_2PO_4 ,
- Fosfato de amonio- $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$.
- Hexametafosfato de sodio- $\text{Na}_3(\text{PO}_5)_6$,
- Tripolifosfato de sodio- $(\text{Na}_5\text{P}_5\text{O}_{10})$,
- Pirofosfato trisódico- $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$.

El fósforo total (PT) incluye la suma de los polifosfatos, proveniente de los detergentes, con los fosfatos orgánicos y el fósforo inorgánico. El funcionamiento ambiental del fósforo está estrechamente gobernado por la baja solubilidad de la mayoría de sus compuestos inorgánicos, por su fuerte adsorción en las partículas de los suelos y por el hecho de que es un nutriente esencial para la mayoría de las formas de vida (animal, vegetal y microbiológica). Debido a sus bajas concentraciones disueltas, el fósforo es usualmente el nutriente limitante en los cuerpos de agua. Las concentraciones del fósforo disuelto frecuentemente se reducen lo suficiente para limitar el crecimiento algal (Weiner, 2008).

2.2. Fuentes de contaminación por nutrientes en sistemas acuáticos

La contaminación por nutrientes en sistemas acuáticos se refiere a los excedentes provenientes de las descargas antrópicas, los cuales alteran el equilibrio del ecosistema. Esta contaminación se relaciona principalmente con la aceleración de la producción ganadera (manejo inadecuado de excretas) y la agricultura (uso ineficiente de fertilizantes y pesticidas), que ocasiona descargas de agua residual con cantidades excedentes de N y P.

Considerando las últimas 5 décadas, las entradas de nitrógeno y fósforo a la biosfera se han duplicado a través de las actividades humanas, tal es el caso del uso inadecuado e incontrolado de suelos para cultivos y ganadería (Seitzinger, et al., 2010). En

el caso de la agricultura, sólo del 10 al 15% de la cantidad de fertilizantes aplicada al suelo es aprovechada por las plantas, el excedente que llega a los cuerpos de agua es a través de las escorrentías (Gijzen & Mulder, 2001). Otras fuentes de contaminación son las descargas de agua residual doméstica e industrial; en las primeras los servicios sanitarios son las principales fuentes de nutrientes seguido de las descargas de detergentes fosfatados. En cuanto a la segunda su aporte de nutrientes es a través de la combustión fósil ya que esta contribuye a la producción de óxidos de nitrógeno, que a su vez favorece la lluvia ácida y el smog fotoquímico (Hanrahan, 2012), existen ciertas industrias como la de los alimentos que en sus descargas de agua residual contienen nutrientes.

Todas las entradas de nutrientes a un lago o embalse provenientes de las actividades antropogénicas realizadas dentro de una cuenca hidrológica¹ degradan la calidad del agua. De ahí la importancia de controlar dichas entradas, a partir de las fuentes generadoras de contaminación, para así disminuir el impacto ambiental debido al exceso de nutrientes. Las fuentes de contaminación provienen de diferentes sitios, tiempo y cantidad, por ello se clasifican en puntuales y difusas.

La peculiaridad de las fuentes puntuales es la fácil caracterización de las descargas, debido a que se introducen al medio ambiente por un solo punto de entrada. Frecuentemente, son monitoreadas a través de la medición periódica de concentraciones de los compuestos químicos en un sólo sitio. Esto hace posible ubicar los sitios con descargas de contaminantes superiores a los límites estandarizados permisibles y así controlar estas descargas a través del tratamiento desde la fuente generadora (Carpenter, et al., 1998). Un ejemplo de fuentes puntuales son las plantas de tratamiento de agua residual, las cuales son consideradas como buena opción para la remoción de contaminantes, sin embargo, investigaciones realizadas en Estados Unidos, han reportado descargas con concentraciones considerables de nitrógeno las cuales persisten hasta varios kilómetros aguas abajo del punto de descarga (Pucket, 1994).

¹ La cuenca hidrológica es una superficie territorial en donde la precipitación cae y se recolecta a través del escurrimiento el cual eventualmente converge hacia los puntos más bajos de la superficie en un cauce principal. Una cuenca suficientemente grande puede contener varias subcuencas pequeñas (Viessman Jr. & Lewis, 2003).

Las fuentes difusas son aquellas que descargan sus residuos en áreas extensas. Generalmente están asociadas a la actividad agrícola, que cuando se maneja por temporada sus volúmenes de descargas no son constantes. Otra fuente difusa con grandes aportes de nutrientes son las descargas asociadas a la actividad ganadera. El estiércol se compone en gran medida por nitrógeno amoniacal (Pucket, 1994).

Comúnmente, las fuentes difusas son terrenos extensos y sus contaminantes son transportados a los cuerpos de agua receptores a través de escurrimientos y lixiviados. Por lo tanto, medir y regular las emisiones de una fuente difusa es más difícil que de una puntual. En la Tabla 2.1, se presentan algunos ejemplos de fuentes puntuales y difusas.

Tabla 2.1. Clasificación de fuentes de contaminación puntual y difusa en una cuenca hidrológica (Carpenter, et al., 1998).

Fuentes de Contaminación

Difusas

- Escorrentía de la agricultura
- Escorrentía de pastoreo y pastizales
- Escorrentía de áreas urbanas sin alcantarillado
- Lixiviados de tanques sépticos y escorrentías de sistemas sépticos fallidos
- Escorrentías de minas abandonadas
- Deposición atmosférica sobre aguas superficiales

Puntuales

- Agua residual (municipal e industrial)
 - Escorrentía y lixiviados de sitios de disposición de residuos
 - Escorrentía y lixiviados de corrales de engorda
 - Escorrentía de minas, petroleras, industria sin drenaje
 - Desagües de alcantarillados de ciudades
 - Desbordes de agua de lluvia combinada con drenajes sanitarios
-

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, las fuentes de contaminación tanto difusas como puntuales son las razones por las que en un embalse o lago se presente la acumulación de nutrientes. Sin duda, al conocer las causas de contaminación, se pueden

aplicar medidas preventivas ya que es más racional la prevención de la contaminación en los cuerpos de agua, que corregirla pues a menudo es costoso y en ocasiones las soluciones propuestas son eficientes para periodos cortos.

A pesar de que los ríos son los principales receptores y transportadores de nutrientes, el problema se acrecienta en lagos y embalses ya que es ahí en donde se acumulan, lo cual significa degradar la calidad de agua hasta el punto en que no sea favorable para el sistema acuático o para su aprovechamiento.

2.3. Eutroficación

La palabra eutroficación (del *gr. eu* = altamente y *trófico* = alimentar), describe la condición cualitativa de los lagos respecto a su alta concentración de nutrientes y productividad primaria. La Directiva de la Unión Europea y algunos tratados internacionales definen a la eutroficación como el crecimiento acelerado de algas, las cuales forman grandes acumulaciones de plantas, ocasionado por el enriquecimiento de nutrientes en el agua, especialmente compuestos de nitrógeno y/o fósforo, el cual promueve un indeseable disturbio en el balance de los organismos presentes en el agua, así como en lo referente a la calidad del agua (WHO/Europea, 2002).

El nitrógeno y el fósforo son nutrientes esenciales para la vida acuática por ser elementos primordiales en la composición y metabolismo celular², debido a esto, son los nutrientes que más se relacionan con el fenómeno de eutroficación. La evidencia de que un cuerpo de agua presenta condiciones eutróficas es el desarrollo exagerado del fitoplancton y plantas acuáticas en la superficie, turbiedad del agua, muerte de la vegetación acuática sumergida que por la falta de luz existe un impedimento de la fotosíntesis ocasionando una pérdida de: oxígeno disuelto, alimento y hábitats (Nebel & Wrigh, 1999).

Es de considerarse que la eutroficación de un lago o embalse, por sí misma, progresa de forma natural, es decir, durante el transcurso del tiempo, un lago se llena lentamente con partículas del suelo erosionado, materia orgánica y otros materiales ricos en nutrientes, los cuales son acarreados por escurrimientos, afluentes y por la propia

² Ver apartado 2.1

producción del mismo cuerpo de agua. Todo ello conlleva a la transformación del lago que eventualmente cambiará a pantano para finalmente ser un sistema terrestre. El problema se presenta cuando las actividades humanas a través de las fuentes difusas y puntuales aceleran el envejecimiento o transformación y acota considerablemente la vida del receptor acuático (Ramalho, 1993).

El efecto de la eutroficación se manifiesta en los cuerpos de agua receptores de descargas de agua residual domésticas, agrícolas, industriales, etc., las cuales contienen aportaciones considerables de fósforo y nitrógeno. Cabe señalar que una cierta productividad de algas es necesaria para sostener la cadena alimenticia en un ecosistema acuático, pero el crecimiento en exceso puede producir el deterioro del cuerpo de agua (Manahan, 2007).

Estudios dedicados a disminuir el proceso acelerado de la eutroficación han demostrado que al controlar los nutrientes limitantes es posible controlar el crecimiento de algas. Los nutrientes limitantes son aquellos que se consumen o alcanzan un mínimo antes que los otros nutrientes relativos a la estequiometría celular de las plantas acuáticas, por ende, es el nutriente que controlará la máxima cantidad de biomasa vegetal (Salas & Martino, 2001). A menudo, la estimación del nutriente limitante para el crecimiento del fitoplancton se realiza comparando la proporción N:P según el cociente Redfield (1958) de 16:1, por ende, tener una proporción mayor a 16, significa que el fósforo es el nutriente a controlar para disminuir la eutroficación.

Una de las herramientas más fiable y eficiente para evaluar el impacto de la calidad del agua de los embalses y lagos naturales debido a la alteración de la carga de nutrientes y su relación con el crecimiento algal, son los modelos de respuesta de Vollenweider/OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 1982), en donde se establecen los índices del estado trófico calculados con base en diferentes parámetros (Fraile, et al., 1995). Por estado trófico se entiende a la condición que tienen los cuerpos de agua con respecto al grado de nutrientes desde oligotrófico, hasta hipereutrófico, lo cual significa un contenido de nutriente de escaso hasta excesivo (WHO/Europea, 2002). Los parámetros establecidos por la OCDE (1982), para medir el estado trófico de lagos templados son: la media anual de fósforo total (PT, mg m^{-3}), la media anual eufótica de

clorofila 'a' (Chla, mg m^{-3}), el valor máximo anual de clorofila 'a' (Chla max, mg m^{-3}) y la profundidad media anual de visión del disco de Secchi (Sec, m).

Dada la compleja interacción entre las variables que intervienen en la eutroficación, es incierto establecer una delimitación estricta entre las distintas clases tróficas, es decir, para algunos cuerpos de agua puede clasificarse en una condición trófica basada en un parámetro, mientras que para un segundo parámetro puede adjudicársele otra condición trófica (Ryding & Rast, 1989). La OCDE, decidió superar dichas limitaciones al usar una evaluación estadística sobre su base de datos, la cual consistió en hacer una correlación entre la carga aportada del parámetro a evaluar y el tiempo de retención hidráulica del embalse para así estimar la respuesta del embalse (grado trófico). La base de datos fue obtenida a partir del estudio realizado en alrededor de cien cuerpos de agua de diferentes ciudades de zonas templadas, los cuales difirieron tanto en estados tróficos como de calidad de agua (Ryding & Rast, 1989).

Debido a que la base de datos de la OCDE es para lagos templados, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) estableció un sistema de clasificación trófica para lagos cálidos, los cuales se definen con base en una temperatura promedio anual máxima de 15°C y mínima de 10°C (Salas & Martino, 2001). Según el régimen térmico y los criterios propuestos por Salas y Limón (1986) los lagos mexicanos se consideran como cálidos tropicales (AYMA, 2011).

En el estudio de CEPIS (2001) se menciona la importancia del papel del nitrógeno como un nutriente limitante para aquellas cuencas donde predominan las fuentes puntuales, por ello se consideró el desarrollo de un modelo de nitrógeno total para lagos tropicales. No obstante, la base de datos fue limitada y el modelo se consideró como preliminar y con la necesidad de un mayor desarrollo. Por esa razón, en los parámetros para medir el estado trófico de lagos tropicales no se incluye al nitrógeno total (Salas & Martino, 2001). En la Tabla 2.2 se muestra el sistema de clasificación del nivel trófico para lagos y embalses con base en los parámetros fósforo total y nitrógeno total entre lagos templados propuesto por OCDE (Ryding & Rast, 1989) y tropicales propuesto por CEPIS (Salas & Martino, 2001).

Tabla 2.2. Comparación de concentraciones límite de NT y PT para diferentes estados tróficos en lagos de zonas templadas y tropicales

Categoría trófica	Zonas templadas ¹ (µg/ L)		Zonas tropicales ² (µg/ L)
	NT	PT	PT
Oligotrófico	371-1 180	5-13	13-28
Mesotrófico	485-1 170	15-49	29-54
Eutrófico	861-4 081	48-189	57-245

¹ Ryding & Rast, 1989

² Salas & Martino, 2001

2.4. Huella hídrica

En el 2002, Hoekstra, definió el concepto de huella hídrica (HH) como un indicador de la cantidad de agua consumida y contaminada a lo largo de la cadena de producción de bienes y servicios. La HH es una herramienta que identifica el grado de contaminación y escasez en los sistemas acuáticos generados por los consumos directo e indirecto³ del agua dulce. La necesidad de crear una herramienta que cuantifique el consumo del agua dulce en comparación con el volumen de agua disponible fue debido a que alrededor del mundo cada vez más se presenta el déficit hídrico.

La HH se ha utilizado como una herramienta que indica si la disponibilidad actual y futura de los recursos hídricos puede soportar la demanda hídrica de un consumidor, productor, grupos de consumidores de un área geográfica (e.g. cuenca hidrológica) o una nación (Casado, et al., 2008; Deurer, et al., 2011; De Miguel, et al., 2012). La evaluación de la disponibilidad del agua para consumo humano depende de la ubicación geográfica, clima, geología y de las modificaciones antropogénicas (construcción de presas, contaminación, entubamiento, etc.) de los cuerpos de agua. De acuerdo con datos reportados en el 2002 por la FAO, el promedio aproximado del consumo humano de agua es 3 600 km³ al año, sin embargo, este volumen no es el único que se debe contemplar al

³ El volumen de agua indirecto se refiere al consumo de agua que fue requerida en el proceso de fabricación pero que no se aprecia en el producto final. El consumo indirecto se relaciona con el comercio de exportación e importación (Parada, 2012).

momento de explotar los sistemas acuáticos ya que parte del volumen de agua debe permanecer en los cuerpos de agua naturales (ríos, lagos, lagunas, acuíferos, etc.) para salvaguardar la integridad del ecosistema acuático y diluir la contaminación (FAO, 2002).

Con la evaluación de la HH se obtiene la información necesaria para establecer planes de acción que resuelvan problemas como el de abastecimiento de agua potable. En México se extraen anualmente en promedio 80 km³ de los acuíferos, de los cuales 61 km³ están destinados a la agricultura, mientras que los 19 km³ restantes se distribuyen entre las actividades domésticas e industriales (Comisión Nacional del Agua, 2011), sin embargo, estos volúmenes no son suficiente para la sobrepoblación que presenta el país, por tanto se presentan problemas de abastecimiento y deterioro de las aguas superficiales que inducen a la explotación de los acuíferos subterráneos más allá de su recarga media anual, lo cual provoca un desequilibrio en el ciclo del agua cuyas manifestación son: sequías, disminución de la biota y disminución de la productividad de los suelos por erosión (Gómez, 2003).

Al evaluar el consumo de agua y su contaminación mediante la HH es posible administrar los sistemas acuáticos tanto en términos de abastecimiento como del adecuado uso para evitar el deterioro de los ecosistemas. Cabe mencionar, que la HH proporciona una idea general de los problemas de escasez o contaminación, más no es una herramienta que informe a la sociedad el modo de resolverlos (Arévalo, et al., 2011). El método establecido por la WFN (Water Footprint Network) para cuantificar la HH consiste en sumar los consumos de agua señalados con los colores azul, verde y gris.

La HH azul es el volumen de agua superficial y subterránea extraída para la producción de bienes y servicios. La importancia de la componente azul es que hace presente el déficit hídrico causado por la extracción del agua de su lugar de origen para incorporarla al producto y por tanto no se devuelve en forma inmediata al ciclo del agua.

La HH verde se enfoca en el volumen de agua de lluvia almacenada y aprovechada sin que llegue a ser escorrentía, a esta agua también se le conoce como el agua contenida en el suelo. El uso más común de la HH verde es el de satisfacer la demanda de la vegetación (ej. la agricultura o producción forestal). En la evaluación de esta huella se

incluye el agua que regresa a la atmósfera por procesos de evapotranspiración ya que permite la existencia de la vegetación natural.

Por último, la HH gris es un indicador de la capacidad de los sistemas acuáticos para asimilar los contaminantes hasta que alcancen los niveles máximos permitidos establecidos por los estándares de calidad de agua (Hoekstra, 2009). La capacidad de los sistemas acuáticos para asimilar los contaminantes se relaciona directamente con su volumen de agua; sin embargo, existen factores como su edafología, es decir, si los suelos de la cuenca hidrológica son permeables o impermeables, la frecuencia y la cantidad de la precipitación para regenerar la cantidad de agua consumida, así como consumos humanos que permiten tener una HH gris específica, aún sí se comparasen cuerpos de agua con el mismo volumen.

En un estudio de HH es necesario definir siempre el alcance, ya que no es lo mismo evaluar el consumo de agua para cubrir las necesidades básicas de los habitantes de una comunidad o región que evaluar sus actividades socioeconómicas, por ejemplo un gobierno nacional puede estar interesado en conocer su dependencia de recursos hídricos con respecto a la de otros países, o bien una empresa puede estar interesada en saber las afectaciones que pudiese tener en su cadena de suministro por la escasez de los recursos hídricos o requiere conocer la manera de reducir el impacto en los sistemas de agua generado durante su proceso de fabricación (Hoekstra, et al., 2009).

Cada objetivo de evaluación de HH requiere su propio ámbito de análisis y permitirá elegir diferentes opciones a la hora de formular estrategias de respuesta, por lo que es muy importante especificar el alcance y nivel de detalle en la contabilidad de la huella hídrica, ya sea desde una perspectiva ambiental, económica o social. Para ello, Hoekstra (2011) propuso cuatro fases en la metodología del estudio de HH (Figura 2.1).

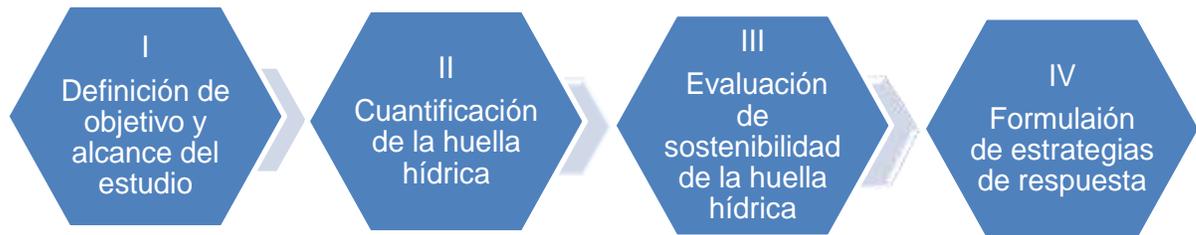


Figura 2.1. Fases para la evaluación de la huella hídrica. Elaboración propia con base en el “Manual de evaluación de la huella hídrica” (Hoekstra, et al., 2011).

Con la primera fase de la metodología se define el nivel de detalle del estudio, en este sentido, se aclara si en un estudio empresarial se analizarán todas las etapas del proceso desde las cadenas de suministros hasta la disposición final del producto o se realizará una comparación entre tipos de productos. De igual manera, para la evaluación de una región geográfica en la primera fase se define el nivel de alcance, ya que al intervenir diversas actividades socioeconómicas el análisis puede ser engorroso. En la segunda etapa se busca que la cuantificación sea concreta y clara para que los valores obtenidos permitan definir bajo qué contexto en particular (ambiental, económico y/o social) se desea realizar el análisis de sostenibilidad hídrica de la tercera fase. La cuarta fase se emplea para la formulación de estrategias para que los tomadores de decisión tengan una herramienta de gestión en política ambiental (Arévalo & Campuzano, 2013).

En las investigaciones de HH a nivel cuenca hidrológica se observa un interés especial en conocer la capacidad de los cuerpos de agua para soportar los sistemas de riego agrícola, ya que en la mayor parte del planeta las extracciones de agua son destinadas a esta actividad, lo cual genera un importante impacto social y ambiental (Arévalo, et al., 2011; Deurer, et al., 2011; De Miguel, et al., 2012; Dumont, et al., 2013; Casado, et al., 2008; Chávez & Binnqüist, 2012). Estos estudios en su mayoría se enfocan a evaluar las HH azul y verde sin considerar la HH gris, ya que su objetivo principal es determinar si los volúmenes de agua disponible son suficientes para los cultivos en cada zona. Mekonnen y Hoekstra (2011), evaluaron la HH (con sus tres componentes) en diferentes tipos de cultivos alrededor del mundo; en su estudio se demuestra que para este sector, el impacto ambiental de escasez contra demanda de agua, evaluada mediante la HH azul, es mayor que el impacto de contaminación por nutrientes analizado con la HH gris; por esa razón en ciertos estudios no se incluye la componente gris, sin embargo, es

importante incluirla ya que el impacto a los ecosistemas por los contaminantes también repercute en la economía.

Por otro lado, las autoridades de una cuenca hidrológica pueden estar interesadas en saber si la HH acumulada de las diferentes huellas de las actividades humanas desarrolladas dentro de esa cuenca infringen las normas de calidad del agua en cualquiera de sus etapas (Hoekstra, et al., 2009). Cuando se estudia la HH de una cuenca hidrológica, se tienen distintas perspectivas a evaluar, desde la huella del consumo de agua por la población ubicada dentro de la zona, la huella sobre los recursos hídricos de la cuenca, hasta el estudio de las importaciones y exportaciones de agua virtual (Samoral, et al., 2011). En este sentido se pueden determinar los usos del agua para el conjunto de las diferentes actividades socioeconómicas desarrolladas dentro de la zona o se puede seleccionar una sola actividad para analizar. Así mismo, se puede analizar cualquiera de las tres componentes por separado de la huella hídrica.

La HH total de una región geográfica se refiere a la suma de todas las huellas que la componen, las cuales se relacionan con determinadas actividades antropogénicas. Es de resaltar que los componentes de la HH total son específicos geográfica y temporalmente. El término temporal se aplica cuando la disponibilidad de datos fluctúa en un cierto período, ya sea anual, mensual o el tiempo que se especifique. En cuanto a la HH geográfica puede considerarse “interna” cuando se evalúa el consumo y contaminación del agua procedente de los recursos de la región de estudio o “externa” cuando se trata de los consumos de agua y su contaminación derivados de los procesos para la producción de bienes y servicios que son importados (Hoekstra, et al., 2011).

A nivel cuenca, la HH de cada actividad económica contribuye a un total de HH final. Sí se refiere a la HH azul total, el impacto de la huella específica de una determinada actividad depende de dos factores: (1) el tamaño de la HH azul específica y (2) la escasez de agua azul en la cuenca. De igual manera, se utiliza el mismo razonamiento para la HH verde. Por su parte, cuando una determinada actividad contribuye a la HH gris total en una cuenca su impacto igualmente depende de dos factores: (1) el tamaño de la HH gris específica y (2) el nivel de contaminación del agua en la cuenca (Hoekstra, et al., 2011). En este sentido, la HH gris no considera únicamente el grado de impacto ambiental generado

por cierta descarga de contaminante debida a la actividad evaluada, sino incluye la contaminación existente previa a la descarga.

La HH cuenta con importantes inventarios de usos del agua englobados en sus componentes: azul, gris y verde, las cuales son agregadas a un valor total. En ese sentido no se puede afirmar que dos productos, empresas o países cuyo valor de huella es el mismo puedan formular las mismas estrategias de solución. Para ello, es necesario tomar en consideración que el agua azul extraída de un pozo tiene mayores impactos al ambiente que el agua azul tomada por gravedad de una presa, o en su caso la huella gris generada en una zona árida impactará más que aquella proveniente de una zona de alta incidencia pluvial que contiene mayor capacidad para asimilar los contaminantes (Farell, 2013).

2.4.1. Huella hídrica y análisis de ciclo de vida

En la literatura se reportan dos enfoques principales para evaluar la HH: (1) la aproximación volumétrica desarrollada por la Red de Huella Hídrica (WFN) y (2) el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) desarrollado por la comunidad de ACV (Vanham & Bidoglio, 2013). La conexión entre los dos conceptos es que ambos parten de un inventario de datos relacionados con el consumo de agua, sin embargo, mientras que con la huella hídrica se evalúa el volumen de apropiación de agua dulce, en el ACV se observan los impactos ambientales locales relacionados con tal apropiación. Este impacto ambiental local depende de la escasez del agua y el nivel de contaminación del agua en las cuencas de interés para el investigador (Hoekstra, et al., 2011). En términos de sinergia ambas metodologías podrían tomar ventajas una de la otra (Boulay, et al., 2013)

El ACV es una metodología desarrollada a partir de la recopilación y evaluación de los impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio. El ciclo de vida se define como las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto desde la extracción de materia prima pasando por la producción, uso, reciclado, hasta su disposición final. Es así como se realiza la compilación del inventario de entradas y salidas relevantes del sistema de producción (Farell, 2013). Anteriormente, en el ACV se había omitido el consumo del agua, hasta que a través de la norma ISO (International Standard Organization) y la UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, la comunidad

del ACV comenzó a desarrollar métodos integrales para la contabilidad del agua (Jefferies, et al., 2012).

De acuerdo a los requisitos mandatorios de la norma ISO 14044, la norma mexicana NMX-SAA-14044-IMNC-2008 Gestión ambiental- Análisis de ciclo de vida- Requisitos y directrices, estableció que en un estudio de ACV se desarrollen las siguientes cuatro fases:

- a) Definición del objetivo y el alcance del ACV. EL objetivo y alcance de un ACV deben estar claramente definidos y deben ser coherentes con la aplicación prevista. En el objetivo se debe especificar claramente las razones para realizar el estudio y si se pretende utilizar los resultados en aseveraciones comparativas previstas para su divulgación.
- b) Análisis del inventario de ciclo de vida (ICV). El inventario consiste en la recopilación de datos tanto cuantitativos como cualitativos para cada proceso unitario incluido dentro del sistema. Los datos recopilados ya sean medidos, calculados o estimados se utilizan para cuantificar las entradas y salidas de un proceso unitario. Es importante especificar y explicar las suposiciones realizadas.
- c) Evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida (EICV). En esta fase se incluye la recopilación de los resultados de indicadores para las distintas categorías de impacto, que juntas representan el perfil de ña EICV para el sistema del producto. Se debe incluir forzosamente la selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización. También es importante mencionar asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación).
- d) Interpretación. Comprende la identificación de los asuntos significativos basados en los resultados de las dos fases anteriores. Abarca una evaluación que considera las verificaciones de los análisis integridad, sensibilidad y coherencia. Por último se menciona las conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

Para algunos propósitos, sobre todo con el fin de llevar a cabo una evaluación del ciclo de vida (ACV), es importante resumir la información sobre la sostenibilidad de la huella hídrica de un producto en un índice o varios índices (Hoekstra, et al., 2011). De esta

manera se puede contabilizar el impacto en tres principales áreas de protección: salud humana, impacto en los ecosistemas y el agotamiento de los recursos.

La HH es una medida volumétrica que muestra el consumo de agua dulce y la contaminación en tiempo y espacio, por tal motivo puede ser utilizada en el inventario de ACV, en particular la azul y en algunos casos la verde. En el caso de la HHG al ser específica para cada contaminante no puede ser comparada con una HH evaluada bajo el contexto del ACV, ya que con este último es posible integrar diversos impactos al ambiente y sustancias en términos de ecotoxicidad, por ejemplo, la degradación de la calidad del agua como un indicador del uso degradado del agua dulce puede ilustrarse parcialmente con la categoría del impacto de la eutroficación. La disminución de la calidad y cantidad del agua pueden ser consideradas cuando se evalúan los impactos del uso del agua en un ACV, porque los cambios en la disponibilidad del recurso hídrico pueden ser generados tanto por el uso consuntivo como degradado del agua dulce.

La norma ISO 14046.- Water footprint.- Requirements and guidelines, tiene como objetivo especificar los principios, requerimientos y directrices para la evaluación y reporte de la HH basado en el ACV. Cuando se aplica esta norma, los estudios dedicados a reportar únicamente los volúmenes de agua pueden ser reportados como inventarios de agua. En este sentido, la HH evaluada bajo el ACV se define como la cantidad total de impactos al agua producidos directa o indirectamente por procesos, productos o servicios en todas sus etapas de ciclo de vida. Según la ISO 14046, para reportar la HH se debe incluir las cuatro fases del ACV, así como, se debe especificar si será determinada para un proceso, un producto o una organización y debe documentarse claramente los límites del sistema a evaluar. De esta manera se estiman los aspectos ambientales y los impactos potenciales asociados con un producto a través de la compilación de un inventario de entradas y salidas relevantes asociados a dichas entradas y salidas, así como la interpretación de los resultados del inventario y de las etapas de evaluación del impacto en relación con los objetivos del estudio. Cualquier discrepancia en el balance del inventario debe ser explicada. Existen diferentes usos del agua que afectan numerosos mecanismos del ambiente, que conllevan a numerosos indicadores de categoría relacionados a áreas de protección (vida humana, calidad de los ecosistemas, recursos naturales), por ello, la norma establece que los indicadores de categoría y los métodos de evaluación de impactos

ambientales deben ser elegidos con base en los alcances y objetivos del estudio. Al evaluar el desempeño ambiental de un sistema por medio del ACV se hace énfasis en los materiales y energía consumida de ahí que se pueda aplicar en la gestión ambiental para medir las intervenciones ambientales causadas por diversos sistemas, desde la cuna a la tumba.

Existen pocos estudios de HH desarrollados junto con el ACV. En México, Farell (2013) desarrolló una metodología para evaluar la huella de agua mediante la transformación de los volúmenes de agua utilizados para producir un bien o servicio en impactos ambientales a través de la inclusión del ACV. La metodología propuesta permitió reportar la huella en una sola medida que integra los impactos en ecotoxicidad acuática y escasez con el fin de facilitar la toma de decisiones. Dicha metodología fue aplicada en agua de uso agrícola, industrial y público urbano cuyos resultados indican que el agua utilizada en el campo genera problemas de abastecimiento para otros usos de la misma región.

Para los intereses de esta investigación se utilizó la metodología propuesta por Hoekstra (2011) para evaluar la HHG, ya que se busca medir el volumen de agua contaminado con NT y PT que se descarga anualmente dentro de la cuenca hidrológica bajo los límites definidos para el estado mesotrófico sin evaluar el grado de ecotoxicidad que a través del estudio del ACV.

2.4.2. Huella hídrica gris

El concepto de huella hídrica gris (HHG) ha crecido a partir del interés de obtener un indicador que relacione el grado de contaminación de agua dulce con el consumo y designación del recurso hídrico. La HHG se define como el volumen de agua dulce necesario para asimilar las cargas de contaminantes hasta el punto donde la calidad del agua sea la óptima para el ambiente y las personas, por lo que se toman como referencia los estándares establecidos de calidad ambiental (Hoekstra et. al., 2011). La HHG, no se refiere a estimar un nuevo uso del agua para descontaminarla, sino a reducir las cargas externas del contaminante en función del volumen de agua del cuerpo receptor (Arévalo, et al., 2011).

Gran parte del volumen utilizado por el ser humano regresa a los cuerpos superficiales de agua con diferente calidad provocando impactos en la fuente de extracción. A través de la HHG se conoce el grado de impacto al recurso hídrico ocasionado por las cargas de contaminantes, ya que al ser un indicador de la capacidad de asimilación de contaminantes se utiliza como referencia la diferencia entre la concentración establecida por la normatividad y la concentración natural, entendiéndose ésta última como aquella que se produciría si no existiese intervención humana dentro del sistema hídrico (Fundación MAPFRE, 2011). El motivo de aplicar el concepto de concentración natural es que si se quisiera comparar la concentración máxima permitida con la concentración real se tendría un remanente de la capacidad de asimilación, lo cual obviamente está en constante cambio en función del nivel de contaminación presente en un tiempo determinado (Hoekstra, et al., 2011).

El cálculo de la HHG (volumen/tiempo) se lleva a cabo dividiendo la carga del contaminante (L^4 , masa/tiempo) entre la diferencia de la concentración máxima admitida por la norma de calidad (C_{max} , masa/volumen) y la concentración natural (C_{nat} , masa/volumen).

$$HG = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}} \quad (2.1)$$

Cabe señalar que la HHG calculada con la Ecuación (2.1), es específica para cada carga de contaminante y depende de los parámetros de calidad del agua, así como de la generación del contaminante por el ecosistema en sí. Todo estudio hidrológico tiene un marco normativo, representado como la concentración estándar (C_{max}), el cual indica los valores o intervalo de valores que el receptor del contaminante puede tolerar. Por otro lado, se encuentra la concentración natural (C_{nat}) que es diferente para cada región de estudio y su magnitud depende de los procesos ecológicos de la zona.

La HHG se refiere a la capacidad que tiene el cuerpo de agua receptor para asimilar un contaminante, por lo que según Hoekstra, una HHG mayor a cero no necesariamente implica la trasgresión de las normas de calidad de agua, simplemente muestra que el recurso hídrico no puede asimilar más contaminantes. Mientras la HHG calculada sea

⁴ La carga del contaminante L (del inglés load) se define como la masa que se dispone al ambiente por unidad de tiempo

menor que el caudal de los ríos o el flujo de agua subterránea, se considerará que hay agua suficiente para diluir los contaminantes al punto de encontrarse por debajo de los límites de calidad ambiental (Hoekstra, et al., 2011).

Es importante destacar que a pesar de que la HHG se expresa en términos de volumen no se refiere a “el volumen de agua contaminada” (porque no es posible contaminar un volumen de agua mayor que la existente), más bien es un indicador de la gravedad de contaminación del agua expresada en términos del volumen de agua dulce para asimilar la carga de contaminantes existentes (Hoekstra, et al., 2011). Por ello en el análisis de la HHG anual, es primordial tomar en cuenta que el grado de autopurificación de los cuerpos de agua receptores, dependen de factores físicos, químicos, biológicos y sobretodo que están limitados por el caudal de los ríos.

Cuando se aplica la HHG a un área geográfica delimitada como lo es una cuenca hidrológica se debe considerar la carga del contaminante por sector económico en lugar de considerar una sola carga a la salida de la cuenca, por lo tanto, se calcula como la suma de todas las HHG relacionadas de cada determinado proceso, producto, productor y consumidor de agua en el área:

$$HHG_{cuenca} = \sum_q HHG_{proc} [q] \quad (2.2)$$

Donde HHG_{cuenca} es la huella hídrica gris total de una cuenca hidrológica y $HHG_{proc} [q]$ se refiere a la huella hídrica gris de un proceso o actividad socioeconómica q dentro de la cuenca hidrológica. La Ecuación (2.2) indica que se debe incluir todos los procesos efectuados dentro del área geográfica que al consumir agua la contaminan (Hoekstra, et al., 2011). Cabe aclarar que la HHG_{proc} se calcula con la Ecuación (2.1), la cual es específica para cada actividad socioeconómica y para cada contaminante.

Las dos formas para estimar las cargas del contaminante en una cuenca hidrológica son a través de las fuentes de contaminación difusa o puntual. El cálculo de carga proveniente de la fuente puntual consiste en multiplicar la concentración de la descarga residual por el volumen del efluente de la descarga. Por otro lado, estimar la carga proveniente de la fuente difusa es más laborioso por dos razones, la concentración no se

puede medir en un punto fijo y no se conoce el volumen del escurrimiento. Por tal motivo el manual para evaluar la HH (Hoekstra, et al., 2011) recomienda tres categorías o clases para estimar la carga del contaminante derivada de una fuente difusa. El grado de detalle y precisión incrementa hacia la tercera categoría, sin embargo, se requiere de datos más exactos que en ocasiones no se consiguen.

En la primera categoría se utiliza información de publicaciones existentes sobre usos de suelo, aplicación del contaminante, entre otros. La estimación de cargas es suficiente para tener un panorama aproximado del impacto ambiental, sin embargo, no describe las transformaciones químicas del contaminante que ocurren a lo largo de su transporte e interacción con el suelo. Tampoco incluye ciertos factores tales como el tipo de suelo, las prácticas agrícolas, la hidrología del suelo (agua localizada en la zona saturada debajo de la superficie del suelo), etc.

En la segunda categoría se aplican enfoques de modelos estandarizados y simplificados tales como balances de nutrientes agrícolas, datos de pérdida de suelo, información básica hidrológica, petrológica e hidromorfológica. Para utilizar los modelos deben estar ampliamente aceptados y validados.

La tercera categoría utiliza técnicas sofisticadas de modelación y se utiliza siempre y cuando los recursos se encuentren disponibles. Estos modelos utilizan versiones simplificadas de datos meteorológicos y del uso de suelo, la desventaja es que su complejidad a menudo los hace inaccesibles para poder estimar la carga de contaminación por fuente difusa

El impacto ambiental de la HHG total de una cuenca (HHG_{cuenca}) siempre estará en función de la escurrimiento disponible para asimilar los residuos. A través del indicador de “nivel de contaminación del agua” (WPL, por sus siglas en inglés) se puede conocer el porcentaje de la capacidad de asimilación de desechos producidos. Se calcula con el valor de la HHG_{cuenca} entre la escurrimiento en el periodo de evaluación de la cuenca (R_{act}). Un WPL del 100% significa que la capacidad de asimilación de residuos ha sido totalmente agotada. Cuando el WPL supera el 100% significa que las normas de calidad ambiental del agua han sido sobrepasadas (Hoekstra, et al., 2011).

En resumen la HHG es un indicador del impacto generado al contaminar el agua consumida. Con el fin de tener una idea del significado del valor de la huella es necesario compararlo con la disponibilidad de los recursos hídricos, para así cubrir la fase tres de HH (evaluación de la sustentabilidad hídrica). Respecto a una evaluación de HHG en un área geográfica es preciso primero calcular la HHG de cada actividad socioeconómica realizada dentro de la región para finalmente sumarla a una métrica final. La calidad del agua dependerá de qué tanto se haya agotado la capacidad del cuerpo receptor para asimilar los contaminantes.

Las primeras investigaciones a nivel internacional sobre la evaluación de HHG por N y P se han enfocado principalmente en el impacto en el proceso de un solo producto, tales como, el uso de fertilizantes y pesticidas en las actividades agrícolas (Carmona, 2010; Areválo, et al., 2011; Deurer, et al., 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2011), También se ha evaluado la HHG de los contaminantes presentes en las descargas de la industria alimenticia (Montalván, et al., 2010). En el caso de cuencas hidrológicas, Liu et al., evaluó las HHG por N y P de diferentes cuencas a nivel mundial y concluyó que la mayoría recibe cantidades de estos nutrientes por encima de la capacidad de los cuerpos de agua receptores para asimilarlos. A su vez en el 2013 Arevalo & Campuzzano contabilizaron la HH para diferentes sectores económicos en la cuenca del Río Porce.

A nivel nacional, México tiene una HH de 197 mil Hm³ de la cual el 14.5% corresponde a la HHG originada principalmente de los productos agropecuarios (AgroDer, 2012). De los estudios sobre HH en el país se encuentra el de Chávez & Binnqüist (2012) en donde se determinó la HH agrícola en la región de Oaxaca, no obstante no incluyeron la HHG. No obstante, es necesario incluir la componente gris para cuantificar correctamente el volumen de agua necesario para asimilar las actividades antropogénicas (Carmona, 2010).

Por otro lado Farrell et al., (2011) evaluó la HH del trigo integrado al ACV, con el fin de incluir los impactos ambientales ocasionados en toda la cadena de producción. En este sentido la HH no se expresa únicamente en términos de volumen de agua contaminada como se hace en la cuantificación de la HHG. Cabe señalar, que la evaluación de la HH con este método considera el grado de presión de las regiones donde se localizan los distritos

de riego de los cultivos evaluados y depende del tipo de cultivo y la cantidad de fertilizantes y pesticidas requeridos.

El aporte de la presente investigación es que se contabiliza la HHG a nivel cuenca hidrológica no de un producto, sino de diferentes actividades antrópicas consideradas como fuentes de nutrientes potenciales que aceleran el proceso de eutroficación.

2.5. Descripción de la cuenca del Río Verde

La zona de estudio del presente trabajo es la cuenca del Río Verde localizada al occidente de México cuya extensión es de 21 895 km². Su área de aporte abarca parte de los estados de Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí y Zacatecas (Tabla 2.3 y Figura 2.2). El nacimiento de su cauce principal está definido por el Río San Pedro a 40 km al sur de la ciudad de Zacatecas, atraviesa el estado de Aguascalientes, en donde cambia de nombre a río Aguascalientes. Finalmente adquiere el nombre de Río Verde cuando recorre las regiones Altos Norte y Altos Sur del estado de Jalisco. La extensión total de la corriente principal supera los 200 km (AYMA, 2006).

La cuenca del Río Verde forma parte de las 58 cuencas de la región hidrológica No. 12 "Lerma-Santiago". Los principales ríos tributarios que forman al Río Verde son; Encarnación, Lagos y El Salto (CEA, 2011).

La división político-administrativa de la cuenca del Río Verde comprende 49 municipios, los cuales están total o parcialmente contenidos en la cuenca (Tabla 2.3). La población dentro de la cuenca es de 1.9 millones de habitantes, de la cual el 57% se concentra principalmente en el estado de Aguascalientes a pesar de que la superficie estatal representa el 20% del total de la cuenca.

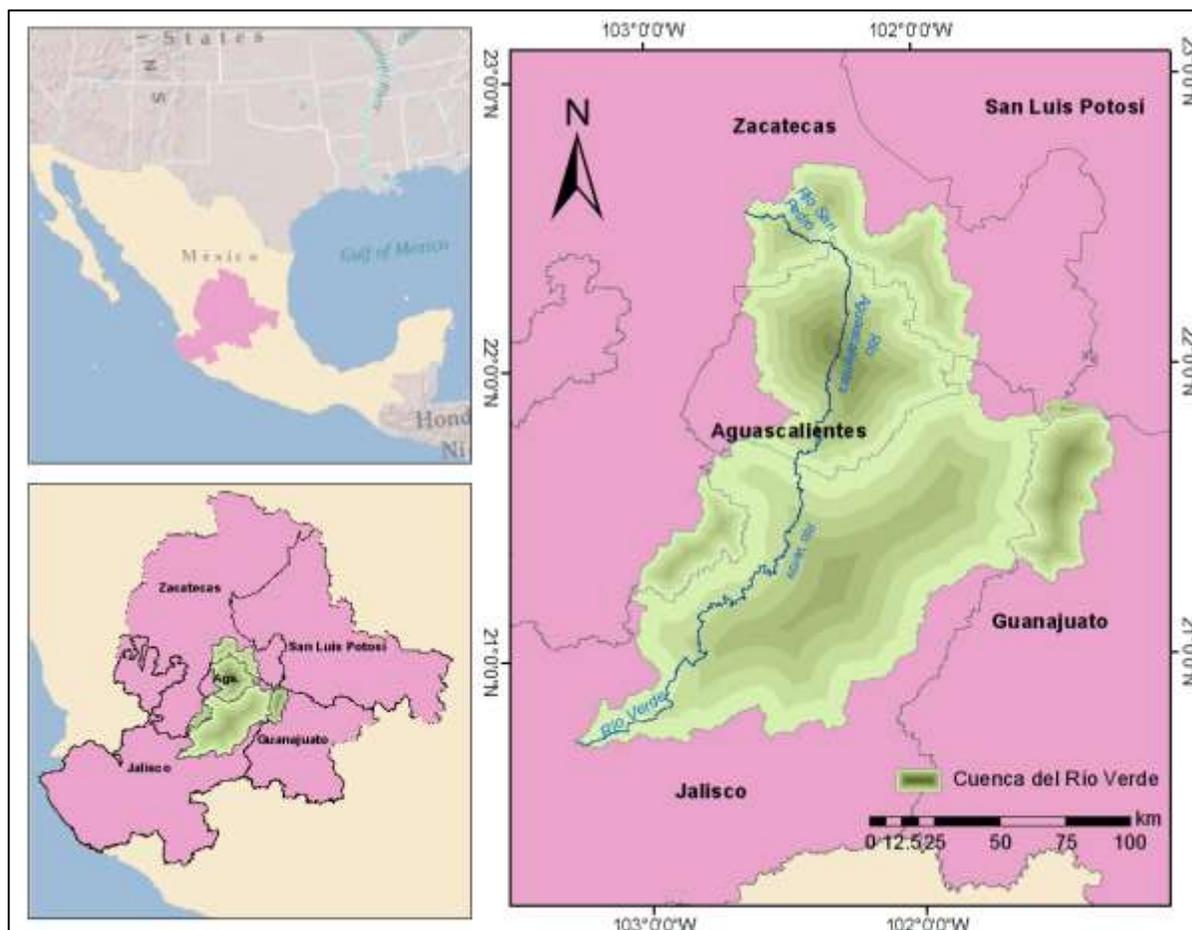


Figura 2.2. Ubicación geográfica de la Cuenca del Río Verde

Tabla 2.3. Municipios incluidos en la cuenca del Río Verde

Nombre del Municipio	Área total municipal	Área municipal en la cuenca del Río Verde	%
	(km ²)	(km ²)	
Aguascalientes			
1. Aguascalientes	1182	1181	100
2. Asientos	554	554	100
3. Calvillo	941	48	5
4. Cosío	130	130	100
5. El Llano	507	507	100
6. Jesús María	505	380	75
7. Pabellón de Arteaga	202	202	100
8. Rincón de Romos	377	377	100
9. San Francisco de los Romo	136	136	100
10. San José de Gracia	866	720	83
11. Tepezala	232	232	100

Determinación de la huella hídrica gris por las cargas de nitrógeno y fósforo en un cuerpo de agua

[2. MARCO TEÓRICO]

Nombre del Municipio	Área total municipal (km ²)	Área municipal en la cuenca del Río Verde (km ²)	%
Guanajuato			
12. León	1234	1	0.1
13. Ocampo	1032	935	91
14. San Felipe	3008	638	21
Jalisco			
15. Acatic	341	250	73
16. Arandas	1146	329	29
17. Cañadas de Obregón	272	272	100
18. Cuquío	637	337	53
19. Encarnación de Díaz	1262	1262	100
20. Ixtlahuacán del Rio	828	173	21
21. Jalostotitlan	518	518	100
22. Lagos de Moreno	2510	2360	94
23. Mexxicacán	289	289	100
24. Ojuelos de Jalisco	1172	856	73
25. San Diego de Alejandría	349	51	15
26. San Juan de los Lagos	848	848	100
27. San Julian	264	207	79
28. San Miguel el Alto	788	778	99
29. Teocaltiche	934	923	99
30. Tepatitlan de Morelos	1429	817	57
31. Union de San Antonio	729	399	55
32. Valle de Guadalupe	351	351	100
33. Villa Hidalgo	451	440	98
34. Yahualica de González Gallo	565	494	87
35. Zapotlanejo	716	87	12
San Luis Potosí			
36. Villa de Arriaga	872	68	8
Zacatecas			
37. Apulco	203	203	100
38. Cuauhtemoc	322	322	100
39. Genaro Codina	797	530	67
40. Guadalupe	814	87	11
41. Loreto	433	421	97
42. Luis Moya	179	179	100
43. Nochistlan de Mejía	877	663	76
44. Noria de Ángeles	406	252	62
45. Ojocaliente	653	487	75
46. Pinos	3173	72	2
47. Trancoso	218	31	14
48. Villa Garcia	329	312	95
49. Villa González Ortega	423	170	40

En cada estado de la cuenca del Río Verde se presentan diferentes usos del agua de acuerdo a las actividades económicas de las cuales predomina la agricultura de forrajes y cereales, así como, la ganadería bovina y porcina. El estado de Jalisco, en donde se localiza la mayor superficie territorial de la cuenca, es el primer productor a nivel nacional de carne de porcino y en cuanto a su agricultura, se distinguen diversos cultivos tales como maíz, sorgo, alfalfa, chile verde, avena y agave, este último empleado en la importante producción tequilera (SAGARPA, 2012). En lo que se refiere a las actividades industriales predomina la alimenticia. Estas actividades en conjunto requieren de un uso intensivo del agua, por ende se pueden esperar grandes cantidades de descargas de nutrientes que llegan a contaminar toda la corriente del Río Verde.

Debido a que la población dentro de la cuenca asciende a más de 4 millones de habitantes (INEGI, 2005) se ha presentado un déficit hídrico, es por esto que se considera el agua del Río Verde como una alternativa para abastecer de agua potable a la ZCG, los Altos de Jalisco y León, Guanajuato. Debido a esto es problema que la calidad del agua del Río Verde decaiga por el exceso de nutrientes. En la corriente del Río Verde, se detectaron concentraciones de N y P mayores a los lineamientos de calidad del agua establecidos por la Ley Federal de Derechos⁵. Las especies detectadas fueron nitrógeno en forma de nitratos, amoníaco, nitrógeno orgánico y nitritos, así como fósforo como ortofosfatos (AYMA, 2011). Es por ello la importancia de conocer la condición eutrófica del Río Verde en términos de HHG.

⁵ Ley Federal de Derechos. Artículo 282 con últimas reformas publicadas en el Diario Oficial de la Federación el 18 de noviembre de 2010.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología empleada para cuantificar la HHG en la cuenca del Río Verde. Para ello, se basó en los inventarios de cargas de N y P provenientes de fuentes difusas y puntuales desarrollados por Corzo (2009). Se completó dicho inventario con información sobre crecimiento de ganado pecuario (Gasque, 2008; Padral, 2013) y de descargas industriales (REPD, 2013). Así mismo se propuso un método para determinar la concentración natural de NT y PT en la cuenca del Río Verde.

El tratamiento de datos tanto de cargas de nutrientes, HHG como de escenarios de reducción se realizó en tres regiones propias de la cuenca del Río Verde: Cuenca Zapotillo-Purgatorio, Región Jalisco y Cuenca del Río Verde.

3.1. Delimitación de las regiones de estudio.

Las regiones de estudio son tres; dos áreas delimitadas de la propia cuenca del Río Verde y el área total de la cuenca hidrológica. A continuación se describen estas regiones.

1. **Cuenca Zapotillo-Purgatorio:** corresponde a una delimitación de la cuenca del Río Verde (subcuenca) que comprende el tramo de la corriente del Río Verde desde la presa *El Zapotillo* hasta la presa *Purgatorio*. Esta región se delimitó mediante el uso del Modelo Digital de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) publicado por INEGI (2013). Se consideró como punto de entrada la localización de la cortina de la presa *El Zapotillo* (21° 00' 01" N y 102° 48' 17" O) y como punto de salida la localización de la cortina de la presa *Purgatorio* (20° 43' 15" N y 103° 14' 18" O). La subcuenca tiene una superficie de 2 358 km² (Tabla 3.1 y Figura 3.1).
2. **Región Jalisco:** abarca la parte de la cuenca del Río Verde que pertenece al estado de Jalisco, por tanto incluye a la Cuenca Zapotillo-Purgatorio. La delimitación de esta región fue política en lugar de hidrográfica, considerando que el estado de Jalisco

ocupa el 55% de territorio de la cuenca del Río Verde con una superficie de 12 043 km² (Tabla 3.1 y Figura 3.1).

3. **Cuenca del Río Verde:** comprende toda la cuenca del Río Verde, por lo que incluye las dos regiones descritas anteriormente. La cuenca tiene una superficie de 21 895 km² (Tabla 3.1 y Figura 3.1).

Tabla 3.1. Descripción de las regiones de estudio

Región	Cuenca Zapotillo-Purgatorio	Región Jalisco	Cuenca del Río Verde
Justificación de su análisis	Se tendrá retención importante de nutrientes en la presa <i>El Zapotillo</i> una vez que entre en funcionamiento, sin embargo, los nutrientes generados en esta región llegarán directo de la descarga a la presa <i>Purgatorio</i> .	Se evaluaron las condiciones de la entidad estatal donde se encuentran las presas <i>Purgatorio</i> y <i>El Zapotillo</i>	La presa <i>Purgatorio</i> , estará situada en la parte baja de la cuenca, por lo que recibirá todas las descargas de nutrientes provenientes de aguas arriba
Descripción	Cuenca del tramo del río Verde desde la presa <i>El Zapotillo</i> hasta la presa <i>Purgatorio</i>	Cuenca delimitada por la división política del estado de Jalisco en relación al resto de los estados	Cuenca hidrológica del Río Verde. Pertenece a la región hidrológica No. 12 al occidente de México.
Superficie (km²)	2 358	12 043	21 895
Número de estados	1	1	5
Número de municipios	11	21	56

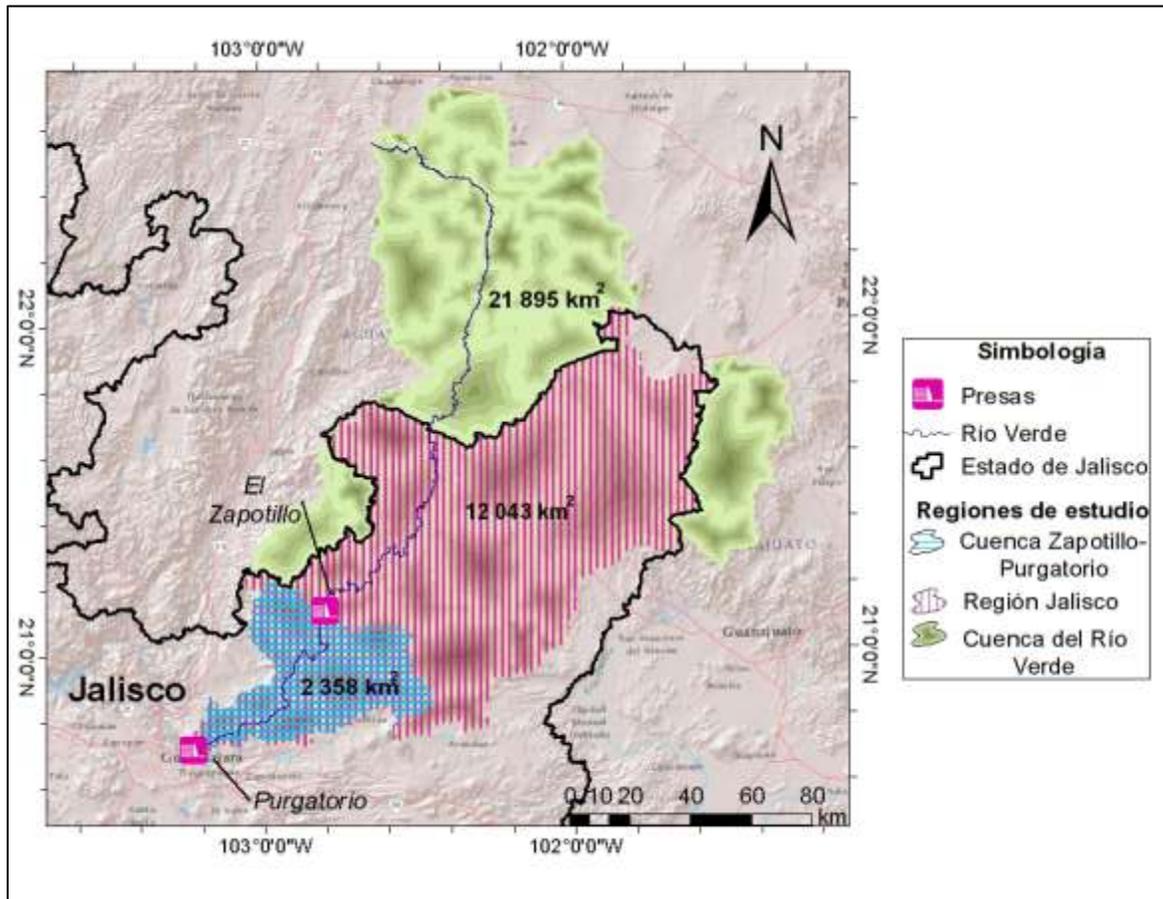


Figura 3.1. Delimitación de las tres regiones estudiadas

3.2. Aplicación y complemento del inventario de nutrientes desarrollado por Corzo (2009)

El inventario de nutrientes utilizado en este trabajo fue el desarrollado anteriormente (Corzo, 2009). En los próximos apartados se describe cómo se aplicó este inventario a las tres regiones de estudio y cómo se completó al incluir la estimación de nutriente en las descargas industriales y al recalcular las cargas de nutrientes por ganado bovino y porcino.

3.2.1. Aplicación del inventario en las tres regiones estudiadas

Las cargas de NT y PT de las fuentes usos de suelo y descargas de aguas residuales municipales empleadas en este trabajo fueron las estimadas por Corzo (2009) y se aplicaron a las tres regiones de estudio.

Para la evaluación de los aportes de NT y PT de los usos de suelo en cada región delimitada, se consideró la parte proporcional de los Polígonos de Thiessen (Figura 3.2) anteriormente determinados. En el caso de que los polígonos abarcaran dos regiones, mediante la proyección en Arc-Gis de los polígonos junto con la carta de usos de suelo y vegetación escala 1: 250 000 serie III (INEGI, 2007), se calculó la fracción de superficie de bosque, matorral, pastizal, agrícola y urbano, que pertenecía a cada región.

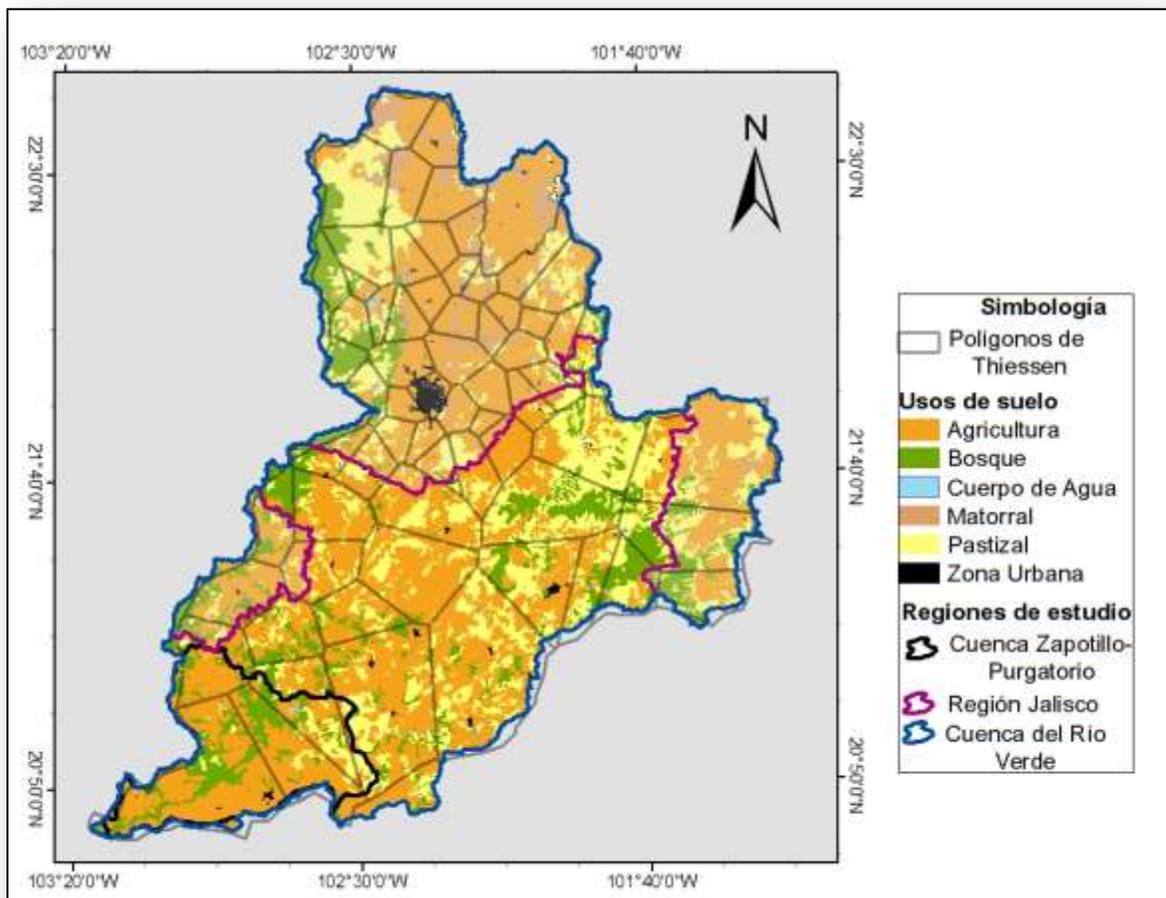


Figura 3.2. Cobertura de usos de suelo y vegetación delimitada por Polígonos de Thiessen en las regiones de estudio

Por otro lado las descargas de agua residual municipal se clasificaron en dos grupos, aquellas que pasan por plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) y las descargas que no reciben ningún tipo de tratamiento. La estimación de las cargas anuales de NT y PT de las

PTAR realizado por Corzo fue con base en los gastos de operación tratados y las concentraciones caracterizadas de los efluentes por tipo de planta. A su vez las cargas anuales de agua residual cruda, las estimó con el volumen de agua residual generada anualmente calculado a partir del número de habitantes, el porcentaje de cobertura de alcantarillado y agua potable y la aportación media de agua residual al sistema de alcantarillado. Todos los datos se unificaron y actualizaron al censo 2010 de INEGI, debido a que se tuvo que complementar los datos faltantes correspondientes a los estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas.

La identificación de las partes de los municipios abarcaron las tres regiones de estudio se hizo a través del Arc-Gis. Así mismo se proyectó el número de habitantes por municipio con el fin de estimar las cargas de NT y PT en cada región.

3.2.2. Recalculo de las cargas de nutrientes por ganado bovino y porcino

La modificación realizada al inventario existente, consistió en recalcular el peso promedio de los animales vivos, así como en estimar el número de animales en función de la proporción de superficie de los municipios, que se encuentran dentro de cada región estudiada. Esto último se calculó mediante uso de Arc-Gis v. 10.

En el inventario aplicado en el estudio de Corzo (2009) se consideró originalmente el peso promedio de los animales llevados a sacrificio. En esta tesis se modificó este peso al cambiarlo por el peso promedio de los animales vivos, el cual se calculó mediante aplicación de curvas de crecimiento, integrando el área bajo la curva y dividiendo entre el tiempo de vida de los animales.

Ganadería porcina. El cálculo del peso promedio de los cerdos a lo largo de su vida se realizó con el área bajo la curva de crecimiento de cerdos dividida entre las semanas de vida (Figura 3.3.). Las cargas de nutrientes generadas en las granjas porcinas se estimaron con el número de cabezas sacrificadas reportadas por Corzo (2009), el peso promedio calculado de 43.5 kg y los datos publicados por la Confederación Mexicana de Porcicultores (CMP), quien al caracterizar las excretas porcinas determinaron que se produce 0.05 kg/UPA*día de NT y

0.013 kg/UPA*día de PT. La unidad de población animal (UPA) equivale a 100 kg de peso vivo por cerdo (Taiganides, et al., 1996).

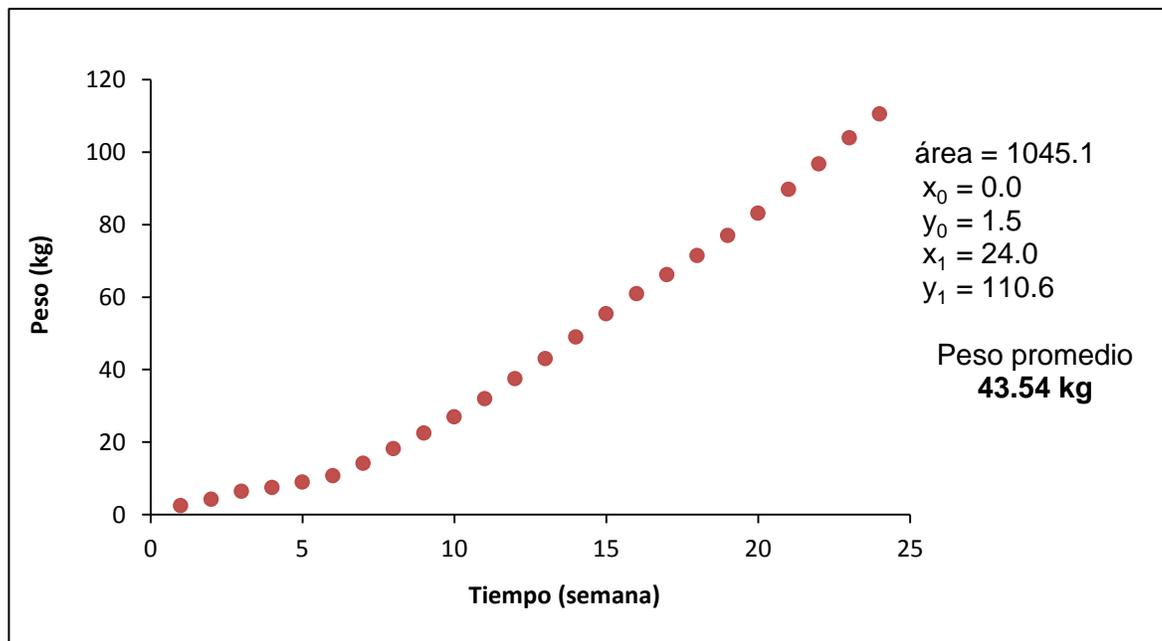


Figura 3.3. Curva de crecimiento de ganado porcino. Elaborado con información proporcionada por Padral (2013)

Ganadería bovina. Por sus diferentes curvas de crecimiento y tiempos de vida, Corzo (2009) identificó que el 51% del ganado bovino es de leche y 49% de carne para el estado de Jalisco. Debido a que no reportó esta distinción para los demás estados, se consideró la misma distribución del ganado bovino que en el estado de Jalisco.

La determinación del peso promedio del ganado bovino de leche y de carne está en función del tiempo de vida del animal. El ganado bovino lechero vive típicamente siete años mientras que el ganado de carne vive dos años antes de que sea llevado a sacrificio. En la Figura 3.4 se muestra la curva de crecimiento de ganado de leche de las razas Holstein y Pardo Suizo, las cuales son las razas más comunes en la ganadería del estado de Jalisco (UGREJ, 2006). Mediante la integración del área de la curva de la Figura 3.4 dividida entre el tiempo de vida, se obtuvo el peso promedio del ganado de leche de 520 kg.

Para el cálculo del peso promedio del ganado de carne, se tomó sólo la primera parte de la curva de crecimiento hasta los 24 meses de edad, cuando se sacrifica el animal, resultando en un peso promedio de 303 kg.

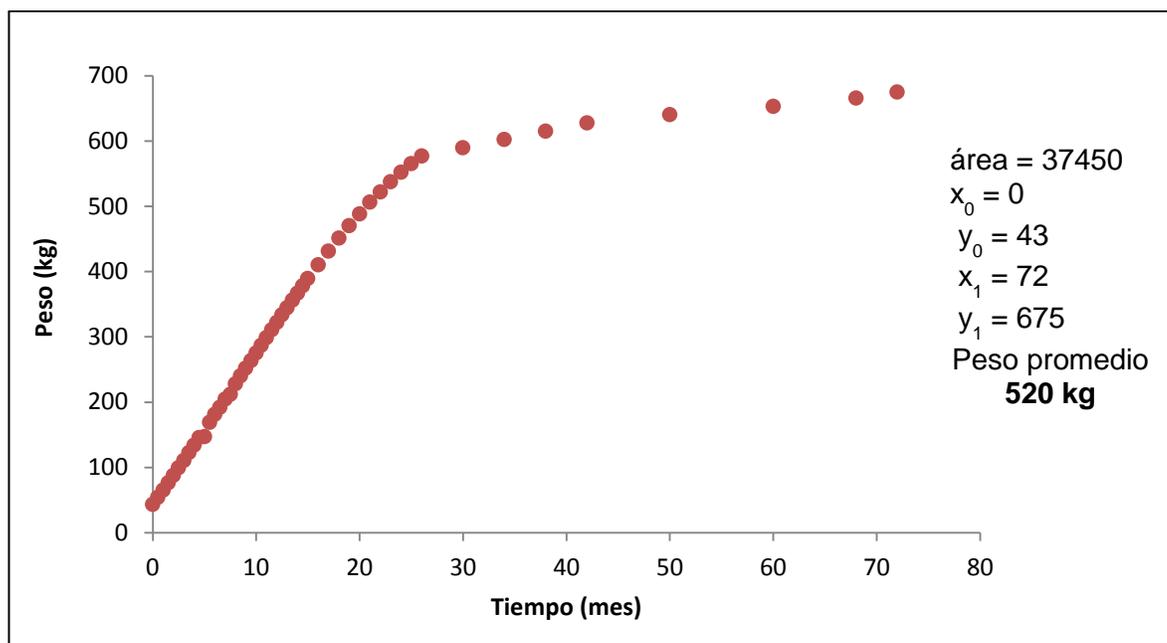


Figura 3.4. Curva de crecimiento de ganado bovino de raza Holstein y Pardo Suizo. Elaborado con información de Gasque (2008)

La estimación de cargas de nutrientes generadas durante el tiempo de vida del ganado bovino, se realizó con: la producción del ganado reportada por Corzo (2009), el peso promedio calculado y la cantidad de N y P en estiércol. La cantidad de nutrientes defecada es proporcional con el peso del animal, por lo tanto con la información de Jones y Sutton (2003) citada por Corzo (2009), se hizo una correlación del peso del animal y la cantidad de nutrientes (AnexoAnexo II), con el fin de determinar las concentraciones de N y P con respecto al peso promedio que tiene el animal durante su tiempo de vida (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Cantidad de nutrientes defecados por el ganado bovino conforme a su peso

Ganado	Producción (Cabezas)	Peso (kg)	N (g/d)	P (g/d)
Bovino de leche	765 548	520	212	86
Bovino de carne	781 508	303	104	80

3.2.3. Inclusión de descargas de agua residual industrial al inventario de cargas de nutrientes

En el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA, 2013) se obtuvo información sobre las 192 empresas con actividad industrial que descargan su agua residual en la cuenca del Río Verde. Se ocuparon los registros de ubicación geográfica, giro de las empresas, volumen concesionado y descargado. Para aquellas empresas, que no contaban con registro de agua descargada, se estimó su volumen al multiplicar la relación volumen promedio descargado/volumen promedio concesionado de 0.41, obtenido a partir de las 33 empresas que cuentan con ambos registros.

El aporte de nutrientes provenientes de las descargas de agua residual industrial se calculó con base en el volumen descargado y el promedio de las concentraciones reportadas por AYMA (2006) para ocho industrias y plantas de tratamiento de agua residual en parques industriales localizados dentro la cuenca, siendo de 75 mg/L para NT y 29 mg/L para PT. La concentración de NT aquí utilizada se comparó con el promedio de las concentraciones típicas de NT en las descargas de 14 giros industriales (Hansen, et al., 1995), representativos a las industrias de la zona de estudio, siendo de 95 ± 59 mg/L. Basado en la comparación se seleccionó las concentraciones medidas por AYMA debido a que son propias de la cuenca e incluye las concentraciones de fósforo.

3.3. Determinación de las concentraciones naturales de NT y PT

La capacidad de un cuerpo de agua para asimilar contaminantes está determinada por la diferencia entre la concentración límite y la concentración natural. Según el método de Hoekstra et al., (2011) la concentración natural⁶ se puede obtener a partir de 1) datos de monitoreo en épocas antes de que existieran las descargas, 2) datos de monitoreo de cuerpos de agua en la cuenca alta, donde no existen descargas contaminantes y 3) uso de modelos que simulen la cobertura de vegetación natural. En este trabajo se optó por obtener la concentración natural a través de la estimación de las cargas de nutrientes provenientes de

⁶ La concentración natural es la que estuviese presente únicamente por los desastres naturales o por los procesos geológicos sin incluir la contribución antropogénica Hoekstra (2011)

escurrimientos de bosque y matorral en toda la cuenca al simular que sólo existiese este tipo de vegetación nativa.

En principio se determinaron las concentraciones “de fondo” de NT y PT en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco, como aquellas que resultan de las concentraciones presentes sin que existiesen las fuentes antrópicas de estas regiones pero incluyendo las provenientes aguas arriba en la misma cuenca hidrológica. Estas difieren de la concentración natural definida por Hoekstra (2011) debido a que incluyen la contribución antropogénica. Este enfoque permitió analizar dichas regiones como sistemas independientes. A continuación se describe cómo se obtuvo la concentración de fondo para cada una de las tres regiones.

1. Para la Cuenca Zapotillo-Purgatorio, las concentraciones de fondo de NT y PT engloban la natural (escurrimientos de bosque y matorral dentro de la región) y la concentración estimada para el efluente de la presa *El Zapotillo*, que son nutrientes generados aguas arriba y que no serán retenidos en la presa⁷, dividido entre el escurrimiento promedio en el río.
2. Para la Región Jalisco, la concentración de fondo se refirió a la concentración natural sumada a la concentración de nutrientes generada por los estados de Aguascalientes, Zacatecas, San Luis Potosí y Guanajuato. Por su ubicación geográfica, en esta región no se consideró la remoción de nutrientes en la presa Zapotillo (ver mapa Figura 3.1).
3. En la cuenca del Río Verde, las concentraciones de NT y PT se estimaron sin considerar las fuentes de contaminación antropogénica, siendo la concentración de fondo igual a la concentración natural.

La concentración natural se estimó con base en el aporte de nutrientes proveniente del bosque y matorral que es la vegetación nativa del lugar. Como se puede observar en el mapa de la Figura 3.2, la cobertura de la vegetación natural ha sido modificada de tal manera que la

⁷ Los porcentajes de retención se tomaron como referencia de estudios realizados en la presa Valle de Bravo, donde se determinó que el porcentaje de retención en promedio es de 32% para el nitrógeno y 75% para el fósforo (Ramírez, et al., 2010; Márquez, et al., 2013).

mayor parte del aprovechamiento del terreno se encuentra destinado a la actividad agrícola y a los cultivos forrajeros (pastizales). Debido a esto, se extrapoló a que la proporción actual de bosque y matorral fuesen el 100% de cobertura de vegetación en toda la cuenca.

La estimación de cobertura partió del método realizado por Corzo (2009) quien en su estudio utilizó el método de Polígonos de Thiessen⁸ para delimitar la cuenca en 97 áreas de influencia correspondiente a cada estación climatológica (Figura 3.2). De esta manera determinó la precipitación media anual (PMA) en cada área con el promedio del registro propio de la estación durante un período de 13 años comprendido entre 1990 a 2002. Cada área de la cuenca delimitada por los Polígonos de Thiessen le corresponde un porcentaje de cobertura de los usos de suelo. Mediante la correlación del porcentaje de cobertura de cada área en función de PMA se extrapoló al 100% la cobertura de bosque y matorral. Con la gráfica de correlación de la Figura 3.5 se obtuvieron las Ecuaciones (3.1) y (3.2) para simular la cobertura de usos de suelo únicamente por bosque y matorral en cada área de influencia demarcada por los Polígonos de Thiessen.

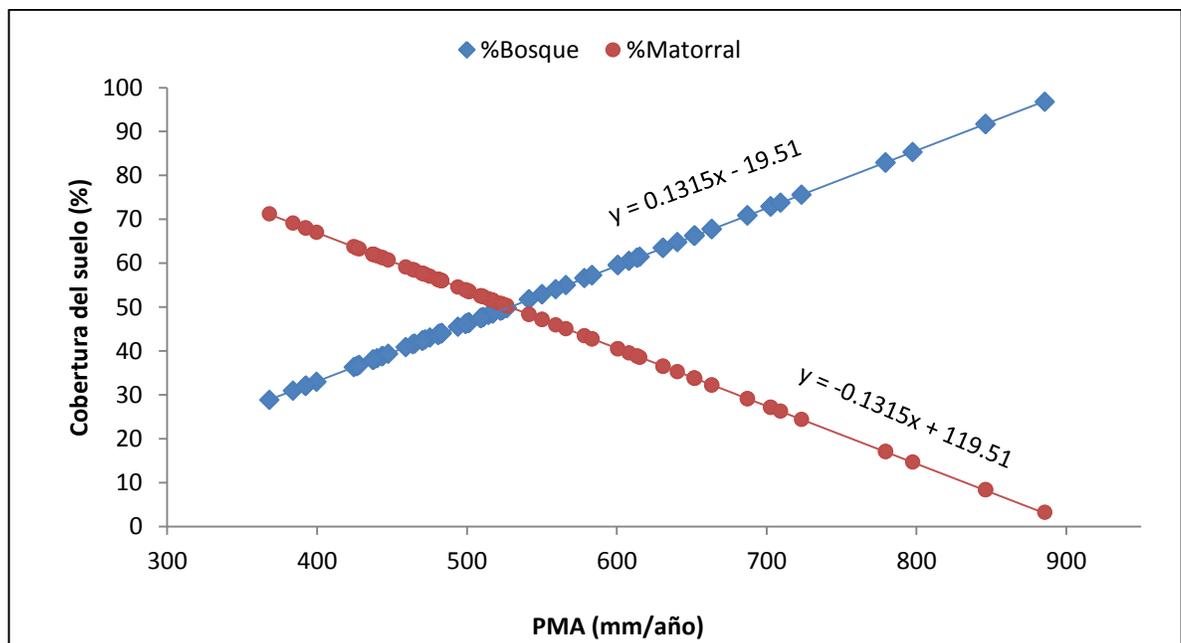


Figura 3.5. Extrapolación de cobertura de áreas de bosque y matorral en función de la precipitación media anual (PMA)

⁸ El método de Polígonos de Thiessen consiste en delimitar áreas de influencia (unidades discretas) a partir de un conjunto de puntos. En hidrología, este método asume que en el área de influencia, definida por la poligonal, ocurre el mismo valor de lluvia de aquel observado en la estación meteorológica más cercana (SAGARPA, 2012).

$$\% \text{ Bosque} = 0.1315 (PMA) - 19.51 \quad (3.1)$$

$$\% \text{ Matorral} = -0.1315 (PMA) + 119.51 \quad (3.2)$$

Con los porcentajes multiplicados por las áreas de influencia se obtiene la superficie de bosque y matorral cuyos aportes de NT y PT están regidos por las concentraciones de la Tabla 3.3 y los escurrimientos medios anuales (EMA) determinados por Corzo (2009), a partir de a ocho estaciones hidrométricas localizadas a lo largo de la cuenca en el período de 1990 a 2002.

El EMA determinado para cada una de las 97 áreas delimitadas por los polígonos fue a partir de la delimitación de la cuenca del Río Verde en ocho subcuencas correspondientes a las estaciones hidrométricas. En cada subcuenca se obtuvo una ecuación para determinar el EMA en función de la PMA a partir del gráfico escurrimiento-precipitación. Las ecuaciones obtenidas se aplicaron en las áreas delimitadas las cuales les corresponde una PMA.

Tabla 3.3. Concentraciones de nutrientes en escurrimientos de bosque y matorral. Recopilado por Corzo (2009).

Usos de Suelo	NT (mg/L)	PT (mg/L)
Bosque	0.83	0.06
Matorral	0.20	0.001

Finalmente, las concentraciones de NT y PT (t/m^3) se determinaron al multiplicar el volumen anual escurrido en cada polígono por la carga ponderada de aportes de bosque y matorral.

La determinación de la concentración natural de NT y PT por región se llevó a cabo con la identificación de las áreas de influencia delimitadas por los polígonos localizadas dentro de las regiones de estudio. De esta manera, la concentración natural estimada fue con base en cinco polígonos en la Cuenca Zapotillo-Purgatorio, 40 polígonos en la Región Jalisco y 97 polígonos en la Cuenca del Río Verde.

3.4. Determinación de la huella hídrica gris

Se realizó la determinación de HHG por NT y PT por fuente de contaminación y por región geográfica. El cálculo de la HHG se realizó empleando la Ecuación (2.1)

$$HG = \frac{L}{C_{\max} - C_{\text{nat}}} \quad (2.1)$$

Donde L es la carga del nutriente, C_{\max} son los límites superiores del estado mesotrófico (Tabla 2.2), C_{nat} son las concentraciones de fondo calculadas para la cuenca del Río Verde.

Las cuatro fases para determinar la HHG de esta investigación se enumeran a continuación:

1. **Definición del objetivo y alcance del estudio.** El análisis de la componente gris de la HH consistió en cuantificar los excesos de NT y PT provenientes de escurrimientos agropecuarios y descargas de aguas residuales industriales y municipales. La aplicación fue a nivel cuenca hidrológica eligiéndose la del Río Verde que a su vez se subdividió en dos regiones: Región Jalisco (enfocada a evaluar los municipios del estado) y la Cuenca Zapotillo-Purgatorio (enfocada a evaluar el tramo del Río Verde entre las dos futuras presas). El alcance del estudio es el de proponer escenarios de reducción de cargas de nutrientes con el fin de reducir la HHG hasta alcanzar la C_{\max} definida en esta investigación.
2. **Cuantificación de la huella hídrica.** Se determinaron las HHG por NT y PT por separado según la Ecuación 2.1. El inventario de cargas de nutrientes generado fue con información recopilada de organismos oficiales gubernamentales y literatura formal desde el 2000 hasta el 2013. Se tomó la precaución de presentar los resultados de manera homogénea en un alcance temporal anual.
3. **Evaluación de la sostenibilidad de la huella hídrica.** El estudio de HHG en este trabajo se enfocó en evaluar la calidad de agua, en términos de la capacidad que tendrá el caudal del tramo del Río Verde entre las presas *El Zapotillo* y *Purgatorio*, que al ubicarse en la salida de la cuenca es un punto estratégico para evaluar las

tres regiones de estudio considerando la retención de nutrientes en *El Zapotillo*. Para ello, se determinó el flujo disponible (495 Mm³/año), el cual corresponde a la suma de los aportes de las presas *El Salto* (afluente del Río Verde) y *El Zapotillo* (177 Mm³/año) (CEA, 2011) y el escurrimiento propio de la Cuenca Zapotillo-Purgatorio (318 Mm³/año).

4. **Formulación de estrategias de respuesta.** Se formularon escenarios de reducción de HHG a volúmenes aceptables que permitan controlar la eutroficación en el tramo del Río Verde entre las presas *El Zapotillo* y *Purgatorio* con base en la fuente de mayor aporte de nutrientes en cada región de estudio.

3.5. Formulación de escenarios de reducción de huella hídrica gris

Del análisis de las HHG por NT y PT se encontró que la actividad pecuaria representa más del 90% de las HHG totales de ambos nutrientes. Por este motivo disminuir las cargas de nutrientes de la actividad pecuaria representa significativamente una reducción de la HHG. A partir de esto se formularon 10 escenarios, los cuales consisten en: dos porcentajes de reducción de carga pecuaria en las tres regiones de estudio y cuatro escenarios considerando la atenuación natural.

Se plantearon reducciones de 50% y 77% de cargas pecuarias de NT y PT con base en la carga crítica ($L_{m\acute{a}x}$), calculada con la Ecuación (3.3). Con una $L_{m\acute{a}x}$, la HHG sería igual al flujo de agua disponible, el cual es requerido en su totalidad para diluir los productos químicos a sus concentraciones más aceptables (Hoekstra, et al., 2011).

$$L_{m\acute{a}x} = V_{dis} \times (C_{m\acute{a}x} - C_{nat}) \quad (3.3)$$

Donde $L_{m\acute{a}x}$ es la carga crítica, V_{dis} es el flujo disponible que tendrá el tramo del Río Verde entre las presas, $C_{m\acute{a}x}$ son los límites superiores del estado mesotrófico y C_{nat} son las concentraciones naturales calculadas.

Además de las reducciones pecuarias los escenarios se formularon para las mismas regiones de análisis de HHG; 1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio, 2. Región Jalisco y 3. Cuenca del Río Verde. A su vez en la región 3. Cuenca del Río Verde, se estudiaron tres escenarios en donde las HHG se determinaron con las cargas de NT y PT a partir de: 3. inventario utilizado en esta tesis, en donde se considera que las cargas son persistentes, 3.i. mediciones en el Río Verde realizadas por AYMA (2011) para considerar la atenuación natural⁹ y 3.ii las mediciones de AYMA simulando el efecto de retención de nutrientes en la futura presa *El Zapotillo*.

Una vez obtenidos los nuevos valores de las HHG, se relacionaron con la HHG permisible, la cual se refiere al flujo anual del caudal que se liberará de la futura presa de *El Zapotillo* y de la presa *El Salto* (tributario del Río Verde), así como del escurrimiento propio de la Cuenca Zapotillo-Purgatorio. En la Tabla 3.4 se presentan los 10 escenarios propuestos

Tabla 3.4. Escenarios de reducción de HHG por NT y PT por región de estudio y disminución de las cargas pecuarias en 50% y 77%

Región	Reducción (%)	Comentario
1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio		La presa <i>Purgatorio</i> recibirá las cargas de nutrientes sin retención de la presa <i>El Zapotillo</i> .
2. Región Jalisco		Se evaluó esta región debido a que la implementación de las acciones de reducción de las HHG corresponde a una sola entidad estatal.
3. Cuenca del Río Verde	50 77	Dentro de la región intervienen diferentes gobiernos estatales para implementar acciones de reducción de HHG.
3.i. Cuenca del Río Verde con atenuación		Se evaluó el efecto de la atenuación natural en las condiciones actuales, por lo que en la estimación de las cargas de NT y PT no se consideró la retención de nutrientes en la presa <i>El Zapotillo</i> .
3.ii. Cuenca del Río Verde con atenuación y retención en la presa <i>El Zapotillo</i>		Se evaluaron las HHG por NT y PT a partir de las concentraciones medidas en el Río Verde, simulando la retención de nutrientes en la presa <i>El Zapotillo</i> .

⁹ Por atenuación natural se refiere a la retención de los nutrientes en el suelo, agua y vegetación a través de procesos de biodegradación que reduzcan su concentración (EPA, 1996). Al tratarse de nutrientes los procesos naturales se relacionan con los ciclos biogeoquímicos (ver capítulo 2.1 de esta tesis).

4. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan y discuten los resultados del complemento del inventario de cargas de nutrientes desarrollado por Corzo (2009) del cálculo de concentraciones de fondo de NT y PT en las diferentes regiones estudiadas, de las determinaciones de las HHG y de la evaluación de los escenarios de su reducción, tanto para NT como para PT.

4.1. Inventario de cargas de nitrógeno y fósforo

Para la evaluación de la HHG, el inventario de cargas de NT y PT se analizó por fuente de nutrientes y por municipios en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco. En este trabajo además se considera la retención de nutrientes de 32% de NT y 75% de PT en *El Zapotillo* (capítulo 3.3 de esta tesis) para todas las cargas generadas aguas arriba de la presa.

En la Tabla 4.1 se presentan las cargas de NT y PT por fuente de nutrientes, en donde se observan, para todos los casos, que las cargas de NT son mayores que las de PT. Los valores presentados son el resultado del complemento al inventario elaborado por Corzo (2009), que consistió en incluir las cargas industriales de PT y completar las de NT recalculando las cargas pecuarias con base en los pesos promedio en vida del ganado bovino y porcino (capítulo 3.2, de esta tesis) y considerar la retención de nutrientes. El resultado de modificar el inventario existente es que se estima que a la presa *Purgatorio* llegarán 58 491 t/año de NT y 14 264 t/año de PT.

Como se puede observar en la Tabla 4.1, la fuente de nutriente de mayor aporte es la actividad pecuaria seguida de las descargas municipales e industriales y la de menor aporte son los usos de suelos. Esta tendencia es la misma que sigue la HHG debido a la particularidad de la ecuación para determinarla, donde las concentraciones de fondo y límites se mantienen constantes, mientras que las cargas de nutrientes difieren conforme a la fuente de contaminación evaluada.

Tabla 4.1. Cargas de NT y PT, en la Cuenca del Río Verde, por fuente de nutriente considerando la retención en la presa *El Zapotillo*.

Fuente de nutrientes	Cargas de nutrientes (t/año)	
	NT	PT
Actividad pecuaria	54 762	13 753
Usos de suelo	737	77
Descargas industriales	922	155
Descargas municipales con tratamiento	929	175
Descargas municipales sin tratamiento	1 140	104
Total	58 491	14 264

Las cargas de NT y PT reportadas en la Tabla 4.2 son el resultado al complemento del inventario existente para los municipios de las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco. Los primeros 10 municipios localizados aguas abajo de la futura presa *El Zapotillo* (Figura 4.1), pertenecen a ambas regiones. El aporte estimado de nutrientes por estos municipios a la presa *Purgatorio* es de 14 665 t/año de NT y de 6 511 t/año de PT.

La Región Jalisco abarca los 21 municipios del estado de Jalisco que están dentro de la cuenca del Río Verde. En este sentido se analizan las cargas de nutrientes que se generan en la región Cuenca Zapotillo-Purgatorio y las cargas de nutrientes de los 11 municipios localizados aguas arriba de la presa *El Zapotillo* considerando la retención de la presa. Por tanto, se estima que de las descargas de nutrientes de esta región, llegarán a la presa *Purgatorio* 46 471 t/año de NT y 11 964 t/año de PT (Figura 4.1).

En el mapa de la Figura 4.1 se presenta el orden de los municipios de las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco que se utilizaran en el análisis de todos los resultados. Los municipios se enumeraron conforme a su ubicación de la confluencia de los ríos Verde y Santiago hacia los Altos de Jalisco.

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

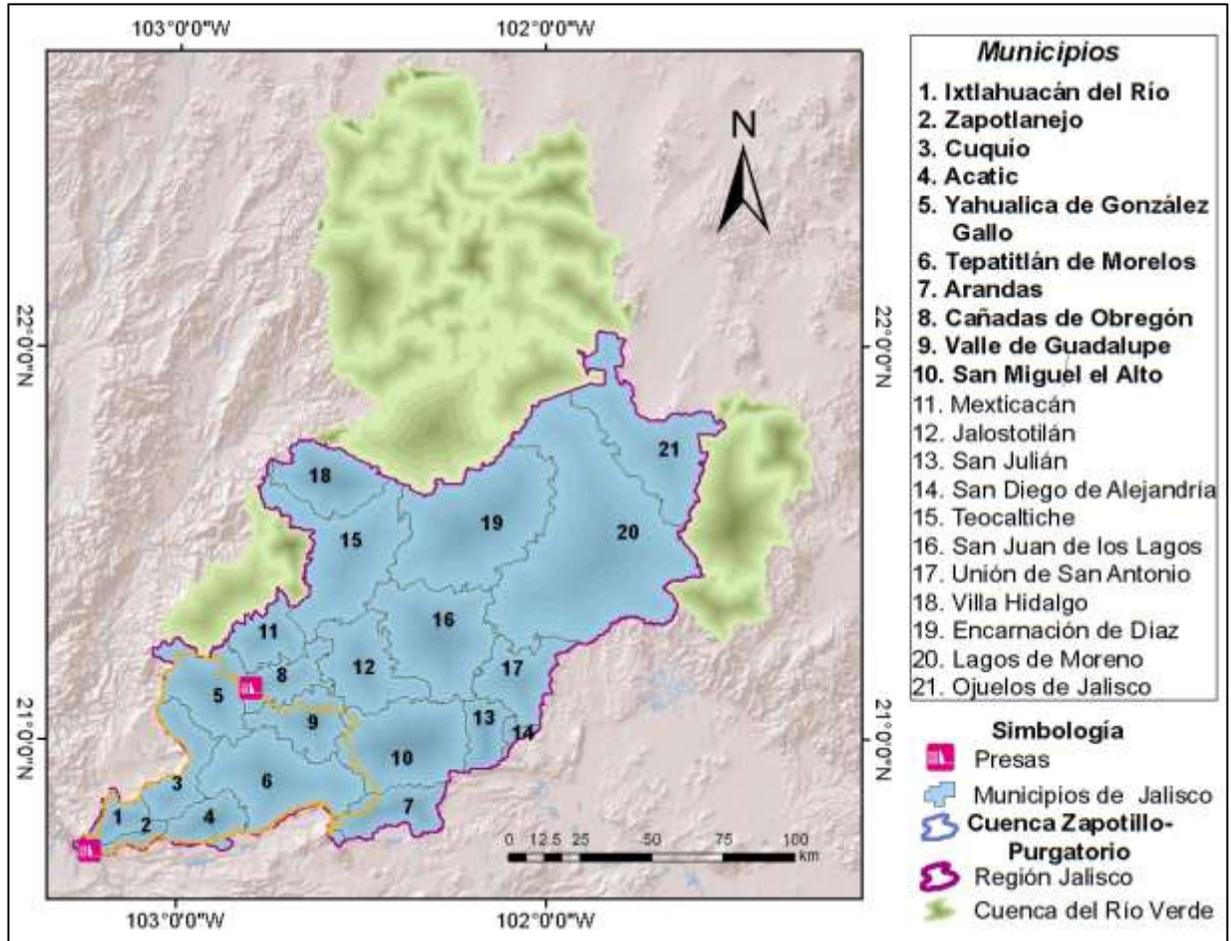


Figura 4.1. Municipios de la Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco

Como se presenta en la Tabla 4.2, los tres municipios de mayor aporte tanto de NT como de PT en la Cuenca Zapotillo-Purgatorio son Tepatitlán de Morelos, Acatic y Yahualica de González Gallo. Estos municipios, tienen una extensa actividad pecuaria, y abarcan más superficie territorial dentro de la cuenca (Tabla 2.3). Lo anterior conlleva a que tengan una mayor fuente difusa de nutrientes debido a su actividad pecuaria que del resto de los municipios.

Para la Región Jalisco, la contribución de nutrientes de los municipios aguas arriba de *El Zapotillo* se refiere a la proporción de descarga que no será retenida en la presa. Esto es que se reporta la proporción que llegará al Purgatorio, no la generada. De esta manera, los tres municipios que más contribuyen con NT son San Juan de los Lagos, Tepatitlán de Morelos y Lagos de Moreno. No obstante, la mayor contribución de PT proviene de

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

Tepatitlán de Morelos, Acatic y San Juan de los Lagos (Tabla 4.2). La diferencia de aportes municipales entre nutrientes en esta región es debido a que la retención del PT en la presa *El Zapotillo* es mayor que la de NT. Esta diferencia se ve reflejada en el análisis posterior de las HHG.

Tabla 4.2. Cargas de NT y PT por municipios en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco

No.	Municipio	Cuenca Zapotillo-Purgatorio	Región Jalisco	Cargas (t/año)	
				NT	PT
1	Ixtlahuacán del Río	✓	✓	247	149
2	Zapotlanejo	✓	✓	775	320
3	Cuquío	✓	✓	559	379
4	Acatic	✓	✓	3 120	1 364
5	Yahualica de González Gallo	✓	✓	956	504
6	Tepatitlán de Morelos	✓	✓	7 155	3 043
7	Arandas	✓	✓	358	143
8	Cañadas de Obregón	✓	✓	67	33
9	Valle de Guadalupe	✓	✓	898	377
10	San Miguel el Alto	✓	✓	528	198
11	Mexicacán		✓	246	57
12	Jalostotitlán		✓	1 845	314
13	San Julián		✓	1 257	183
14	San Diego de Alejandría		✓	159	36
15	Teocaltiche		✓	3 212	544
16	San Juan de los Lagos		✓	8 724	1 273
17	Unión de San Antonio		✓	379	91
18	Villa Hidalgo		✓	958	208
19	Encarnación de Díaz		✓	4 593	706
20	Lagos de Moreno		✓	5 876	1 131
21	Ojuelos de Jalisco		✓	1 350	371
Total Cuenca Zapotillo-Purgatorio		10 municipios		14 665	6 511
Total Región Jalisco			21 municipios	46 471	11 964

4.2. Concentración natural de NT y PT

Los valores estimados de las concentraciones natural o “de fondo” (C_{nat}) de NT y de PT por región geográfica se presentan en la Tabla 4.3 y se comparan con los límites máximos del estado mesotrófico de cada nutriente.

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones de fondo, las cuales incluyen aportes antropogénicos de aguas, estimadas para las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco están por encima de las $C_{máx}$, lo cual significa que aun considerando la retención de nutrientes en la presa *El Zapotillo*, las descargas de NT y PT generadas por las fuentes de contaminación aguas arriba de esta presa, no son retenidas lo suficiente para alcanzar C_{nat} por debajo de $C_{máx}$.

Por otro lado, las C_{nat} de NT y PT en la región Cuenca del Río Verde, están por debajo de las $C_{máx}$, lo cual significa que sólo la condición de cobertura de bosque y matorral en toda la cuenca es la adecuada para estimar una C_{nat} inferior a la $C_{máx}$. Es importante que la diferencia de estas concentraciones sea positiva ya que indica la capacidad del cuerpo de agua para asimilar los nutrientes. De lo contrario una C_{nat} superior a la $C_{máx}$ señala que el cuerpo de agua se encuentra sobresaturado antes de incluir los aportes antropogénicos.

Tabla 4.3. Comparación de las C_{nat} obtenidas en cada región de estudio con las $C_{máx}$

Nutriente	C_{nat} (mg/L)			$C_{máx}$ (mg/L)
	Cuenca Zapotillo-Purgatorio	Región Jalisco	Cuenca del Río Verde	Límite superior del estado mesotrófico
NT	93.74	15.93	0.63	1.17 ¹
PT	16.55	2.98	0.04	0.05 ²

¹ (Ryding & Rast, 1989)

² (Salas & Martino, 2001)

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

Con los resultados de C_{nat} , se descartó la propuesta de evaluar las HHG de las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco como sistemas independientes al resto de la cuenca del Río Verde, por lo tanto para la determinación de sus HHG se utilizó la C_{nat} estimada en la Cuenca del Río Verde y las cargas de nutrientes evaluadas para cada región.

Es importante mencionar, que en las regiones evaluadas se consideran las emisiones de nutrientes pero no su atenuación natural⁹ en agua, suelo y vegetación. Dicho esto, se conjetura que al tomar en cuenta la atenuación, en la Región Jalisco será posible alcanzar la C_{nat} por debajo de la $C_{máx}$, debido a que la proporción territorial de esta región abarca el 55% dentro de la cuenca del Río Verde. Sin embargo, con la información con la que actualmente se cuenta y los alcances de este trabajo no se comprueba esta hipótesis

4.3. Evaluación de la huella hídrica gris (HHG)

Las HHG determinadas para la cuenca del Río Verde es de 109 072 Mm³/año por NT y de 1 123 128 Mm³/año por PT. Los resultados de estas se generaron a partir de dos tipos: HHG por fuente de contaminación y HHG por región geográfica ambas estimadas en unidad de tiempo anual durante el período 2000-2013. El análisis de las HHG se describe primero por fuentes de contaminación para la región Cuenca del Río Verde para posteriormente analizar las HHG de las regiones delimitadas; Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco.

4.3.1. HHG por fuentes de nutrientes

Las HHG por NT y PT aquí analizadas corresponden a la región Cuenca del Río Verde. Debido a que se desea evaluar la condición trófica de la presa *Purgatorio*, las HHG por NT y PT determinadas por fuente de contaminación en la Cuenca del Río Verde corresponden a la suma de las HHG provenientes aguas arriba de *El Zapotillo* más las determinadas aguas abajo de la presa.

Al comparar la HHG total para PT con la total para NT, en la región Cuenca del Río Verde, se obtuvo una relación 10:1, la cual es diferente a la observada en la estimación de

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

la carga de nutrientes en donde se estiman descargas con mayor contenido de NT que de PT. Esto indica que el PT promueve la condición eutrófica debido a que las condiciones naturales del Río Verde (aportes de nutrientes que recibe el río debido a la vegetación) han agotado gran parte de la capacidad para las descargas antropogénicas de fósforo, en otras palabras, la diferencia de $C_{m\acute{a}x}$ menos C_{nat} del PT es menor que la del NT (Tabla 4.3).

Las HHG estimadas por fuente de contaminación o de nutriente, así como sus porcentajes con respecto al valor total se presentan en la Tabla 4.4. La tendencia de prioridad de las HHG por fuente está relacionada con su carga de nutriente, siendo así que las HHG por NT y PT de la actividad pecuaria representa más del 90% de sus respectivas HHG totales. Por tal motivo se sugiere que para reducir las HHG tanto para NT como para PT en la Cuenca del Río Verde se debe reducir las descargas pecuarias.

Tabla 4.4. HHG por NT y PT por fuente de contaminación en la región Cuenca del Río Verde

Fuentes de nutrientes	HHG			
	NT (Mm ³ /año)	NT (%)	PT (Mm ³ /año)	PT (%)
Actividad pecuaria	102 119	93.6	1 089 930	96.4
Usos de suelo	1 375	1.26	6 036	0.54
Descargas industriales	1 719	1.57	12 223	1.09
Descargas municipales con tratamiento	1 733	1.59	13 748	1.22
Descargas municipales sin tratamiento	2 126	1.95	8 191	0.73
Total	109 072	100	1 123 128	100

En la gráfica de la Figura 4.2 se presentan las HHG por NT y PT por fuente de nutriente y se comparan con el volumen de agua anual disponible. Las HHG representadas en la gráfica indican que todas las fuentes de nutrientes aportan más cantidades de NT y PT de las que el cuerpo receptor puede asimilar. Por tanto a pesar de que las HHG de la actividad pecuaria representan más el 90% de las totales, las descargas de nutrientes de las otras fuentes de contaminación también propiciarán que la presa *Purgatorio* presente condiciones eutróficas.

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

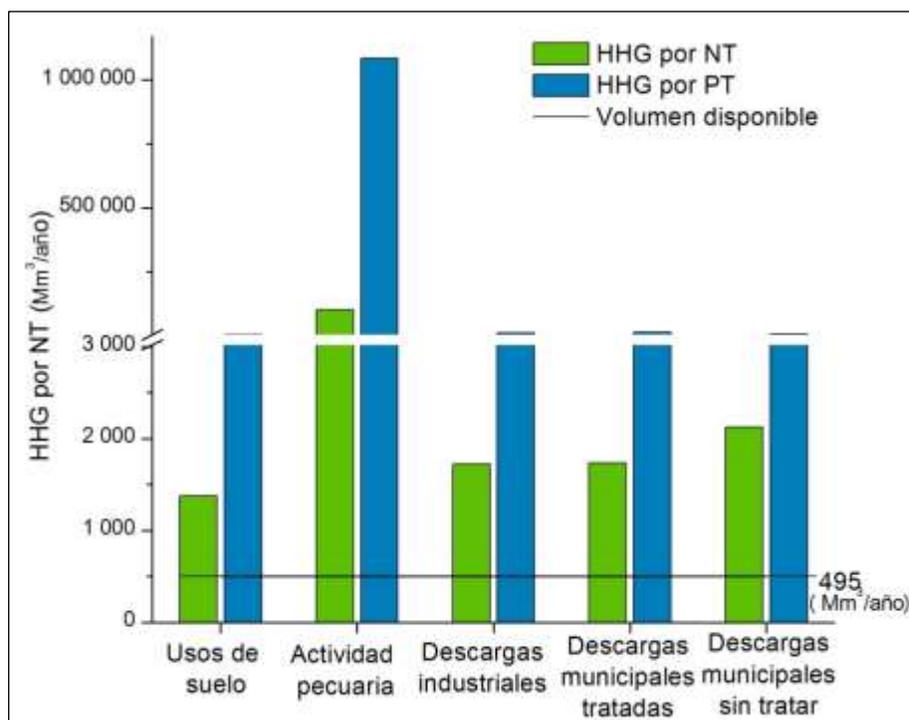


Figura 4.2. HHG por NT y PT por fuente de nutriente y volumen de agua disponible entre las presas El Zapotillo y Purgatorio en comparación con el volumen de agua disponible

A continuación se describen las HHG por NT y PT de la actividad pecuaria, generadas en la Cuenca del Río Verde, la cual se compone por ganadería bovina y porcina. A su vez la ganadería bovina se analiza por producción de leche y de carne. En la Tabla 4.5 se presentan las cargas generadas de NT y PT por tipo de ganado, así como sus HHG.

Tabla 4.5. HHG de la actividad pecuaria por tipo de ganado en la cuenca del Río Verde

Ganado	Cabezas	Cargas (t/año)		HHG (Mm³/año)	
		NT	PT	NT	PT
Bovino de leche	765 548	26 399	5 682	49 227	447 354
Bovino de carne	781 508	14 962	6 074	27 900	478 243
Porcino	3 801 095	13 402	1 998	24 992	157 333
Total	5 348 150	54 763	13 753	102 119	1 082 930

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

Las HHG de la actividad pecuaria se relaciona con dos premisas importantes: 1) el peso promedio del animal vivo y 2) el número de cabezas de ganado existente. El primero hace referencia a la cantidad de nutrientes excretada por animal a lo largo de su vida y el segundo representa el volumen anual de carga de nutrientes descargados dentro de la Cuenca del Río Verde. Como se observa en la Tabla 4.5 el número de cabezas del ganado porcino es dos veces más que la suma del número de cabezas de ambos ganados bovinos, sin embargo, su HHG es la más pequeña (Figura 4.3 y Figura 4.4), esto es debido a que un cerdo excreta 0.01 t/año de NT y 0.004 t/año de PT, mientras que una vaca excreta los 0.06 t/año de NT y 0.03 t/año de PT (Anexo II).

Al comparar las HHG por NT de los tres tipos de ganado se puede observar que el ganado bovino de leche representa 48% del total (Figura 4.3). Este porcentaje se relaciona con los 212 g/día de NT estimados en la excreta de una vaca destinada a la producción de leche en comparación con los 104 g/día de NT en la excreta de una vaca destinada a la producción de carne (Tabla 3.2).

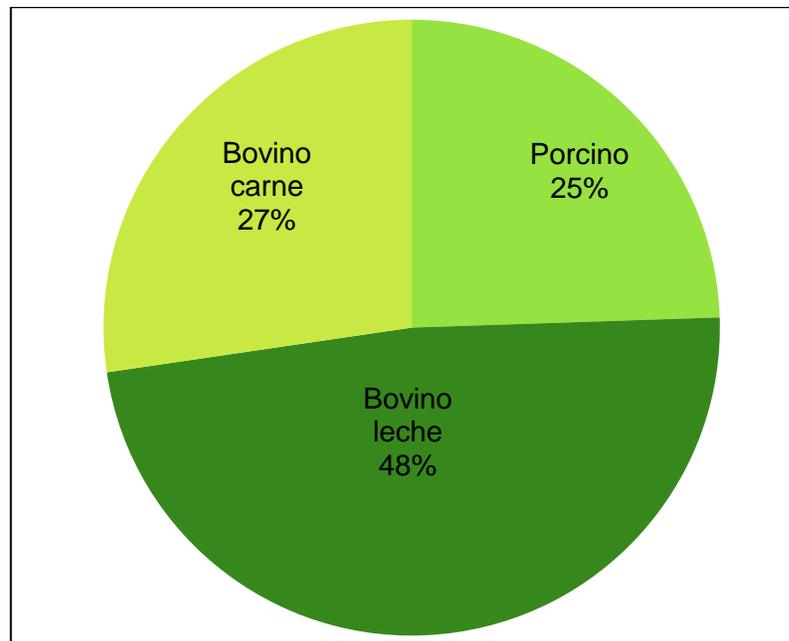


Figura 4.3. HHG por NT de la actividad pecuaria (102 119 Mm³/año) por tipo de ganado en la cuenca del Río Verde

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

A su vez, la HHG por PT del ganado bovino de carne representa el mayor porcentaje (44%) con respecto al total (Figura 4.4). Este porcentaje se relaciona con el número de cabezas de ganado existente (Tabla 4.5) más que con el contenido de PT en las excretas pues una vaca destinada a la producción de leche excreta 86 g/día de PT y una vaca destinada a la producción de carne excreta 80 g/día de PT.

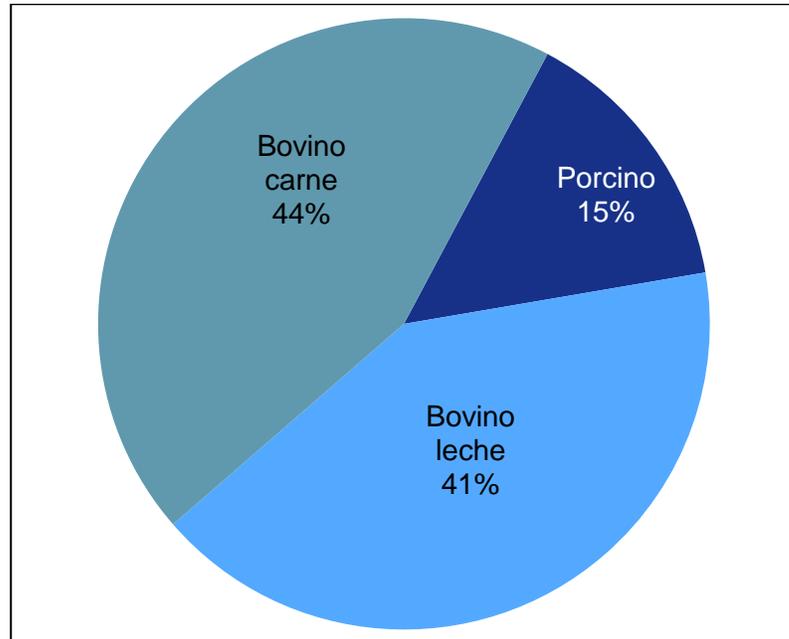


Figura 4.4. HHG por PT de la actividad pecuaria (1 082 930 Mm3/año) por tipo de ganado en la cuenca del Río Verde

En el análisis de las HHG de la actividad pecuaria, se muestra que las excretas de los dos conjuntos de ganado bovino son las que más requieren volúmenes de agua, superiores al disponible, para que sus descargas de NT y PT puedan ser asimiladas por el Río Verde. De ahí la importancia de tratar las excretas bovinas, ya que en México, su tratamiento y disposición final es mediante el secado al aire libre en un terreno cercano al establo por un periodo de 8 a 12 meses, lo cual ocasiona que los sistemas acuáticos se contaminen a través de las ecorrentías formadas en periodos de lluvias (FAO, 1999)

Por otra parte el análisis de las HHG por NT y PT de los usos de suelo se realiza por superficie territorial dentro de la Cuenca del Río Verde, así como por sus aportes de

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

nutrientes. Los usos de suelo abarcan 20 591 km² del territorio total dentro de la cuenca, el resto de la superficie está cubierto por cuerpos de agua. En la Tabla 4.6 se presenta un resumen de los datos así como de los resultados para el análisis.

Tabla 4.6. HHG por NT y PT por uso de suelo en la cuenca del Río Verde

Usos de suelo	Área (km ²)	Carga (t/año)		HHG (Mm ³ /año)		HHG _s (Mm ³ /año·km ²)	
		NT	PT	NT	PT	NT	PT
Urbano	201	9	1	16	82	0.082	0.407
Agrícola	8 137	364	59	679	4 609	0.083	0.566
Bosque	2 314	51	2	96	183	0.041	0.079
Matorral	2 032	15	0.04	28	3	0.014	0.002
Pastizal	7 907	298	15	556	1 163	0.070	0.147
Total	20 591	738	77	1 376	6 040	-	-

El aporte de nutrientes de los diferentes usos de suelo depende directamente de su cobertura territorial. En la Cuenca del Río Verde las prácticas agropecuarias han inducido a que los usos de suelo agrícola y pastizal cubran el 43% (8 137 km²) y 38% (7 907 km²) respectivamente de la superficie total de la cuenca (Tabla 4.6). Por lo tanto sus descargas de nutrientes, así como sus HHG representan la mayor proporción de las totales para los diferentes usos de suelo (Figura 4.5 y Figura 4.6).

Para comprender la cantidad de volumen requerido por los diferentes usos de suelos se hace el análisis de cada huella hídrica gris por kilómetro cuadrado (HHG_s). Los resultados de HHG_s para NT y PT indican que el uso de suelo agrícola es el que mayor volumen de agua requiere para asimilar sus descargas en una superficie de un kilómetro cuadrado. Por otro lado, al comparar las HHG_s para NT y PT del uso urbano con las del uso por pastizal (Tabla 4.6), se observa que un suelo urbano descarga más cantidad de nutrientes por kilómetro cuadrado que el uso por pastizal, por ende requiere de un mayor volumen de agua para asimilar sus descargas. Sin embargo, como el uso de suelo urbano

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

tiene una menor superficie territorial en toda la cuenca del Río Verde sus HHG ($Mm^3/año$) son menores que las del uso por pastizal.

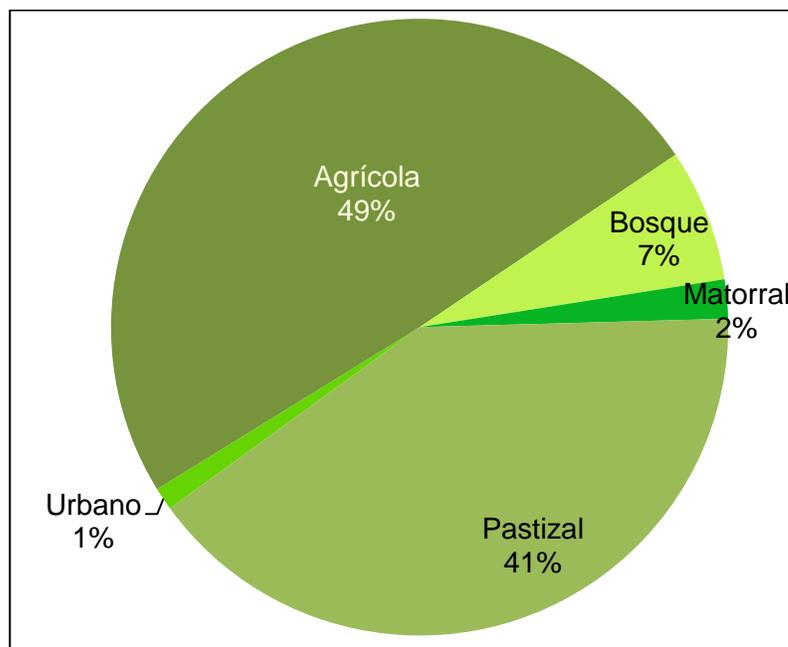


Figura 4.5. HHG por NT por uso de suelo ($1\ 376\ Mm^3/año$) en la cuenca del Río Verde

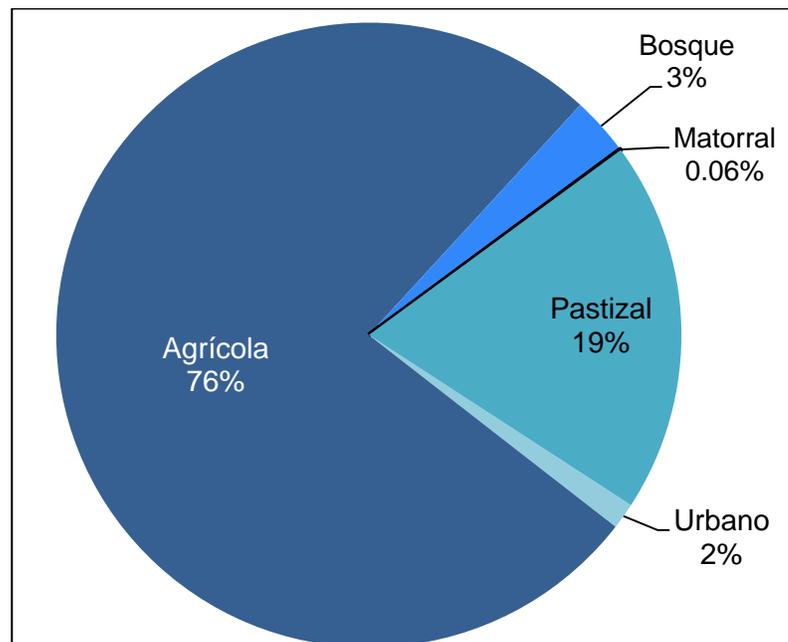


Figura 4.6. HHG por PT por uso de suelo ($6\ 040\ Mm^3/año$) en la cuenca del Río Verde

4.2.2. HHG por división política a nivel municipal

La cuenca del Río Verde se delimitó en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco. En la primera región se evalúan las HHG por NT y PT de los 10 municipios localizados aguas abajo de la presa *El Zapotillo*. En la segunda región se analizan las HHG de los 21 municipios del estado de Jalisco que pertenecen parcial o totalmente a la cuenca del Río Verde (Figura 4.1).

En la Tabla 4.7 se enlistan los resultados de las HHG por municipios y los totales de las regiones. Para fines prácticos el análisis de HHG de los municipios aguas abajo de la presa *El Zapotillo* se realiza refiriéndose a la región Cuenca Zapotillo-Purgatorio obviando que también pertenecen a la Región Jalisco. De esta manera las HHG de los municipios aguas arriba de dicha presa se analizarán en referencia a la Región Jalisco. Es importante señalar que en esta investigación se consideraron los aportes de nutrientes que llegarán a la presa *Purgatorio*, por esto se eligió como flujo disponible al caudal que tendrá el tramo del Río localizado entre ambas presas el cual es de 495 Mm³/año.

En la Cuenca Zapotillo-Purgatorio los municipios Ixtlahuacán del Río (No. 1) y Cañadas de Obregón (No. 8) son los únicos cuyas HHG por NT se encuentran por debajo del flujo disponible. En cambio ningún municipio cuenta con una HHG por PT por debajo del flujo disponible (Tabla 4.7)

En cuanto a la Región Jalisco, se puede observar que los municipios Mexxicacán (No. 11) y San Diego de Alejandría (No. 14) presentan HHG por NT por debajo del flujo disponible pero no en sus HHG por PT (Tabla 4.7).

Determinación de la huella hídrica gris por las cargas de nitrógeno y fósforo en un cuerpo de agua

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

Tabla 4.7. HHG de las partes de los municipios que se encuentran dentro de las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco

No.	Municipio	Cuenca Zapotillo-Purgatorio	Región Jalisco	HHG (Mm ³ /año)	
				NT	PT
1	Ixtlahuacán del Río	✓	✓	461	11 744
2	Zapotlanejo	✓	✓	1 445	25 226
3	Cuquío	✓	✓	1 042	29 839
4	Acatitlán	✓	✓	5 819	107 398
5	Yahualica de González Gallo	✓	✓	1 783	39 653
6	Tepatitlán de Morelos	✓	✓	13 342	239 595
7	Arandas	✓	✓	668	11 283
8	Cañadas de Obregón	✓	✓	490	6 117
9	Valle de Guadalupe	✓	✓	1 674	29 722
10	San Miguel el Alto	✓	✓	6 602	54 500
11	Mexicacán		✓	459	4 499
12	Jalostotitlán		✓	3 440	24 711
13	San Julián		✓	2 344	14 410
14	San Diego de Alejandría		✓	296	2 816
15	Teocaltiche		✓	5 989	42 824
16	San Juan de los Lagos		✓	16 269	100 252
17	Unión de San Antonio		✓	707	7 202
18	Villa Hidalgo		✓	1 786	16 410
19	Encarnación de Díaz		✓	8 565	55 558
20	Lagos de Moreno		✓	10 958	89 082
21	Ojuelos de Jalisco		✓	2 518	29 221
Total Cuenca Zapotillo-Purgatorio		10 municipios		27 344	512 645
Total Región Jalisco			21 municipios	86 656	942 060

En el mapa de la Figura 4.7 se presenta la tendencia de la HHG por NT en cada municipio. Cabe aclarar, que se sumaron las HHG de los municipios pertenecientes a los estados de Aguascalientes, Guanajuato, San Luis Potosí y Zacatecas (color verde jaspeado), resultando una HHG por NT de 22 415 Mm³/año.

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

Las HHG por NT de los municipios de Tepatitlán de Morelos (No. 6), Lagos de Moreno (No.20) y San Juan de los Lagos (No.16) son las mayores. Como se observa en la Figura 4.7, la tendencia de HHG no es de aguas arriba hacia aguas abajo, más bien se refiere a las actividades socioeconómicas de la región.

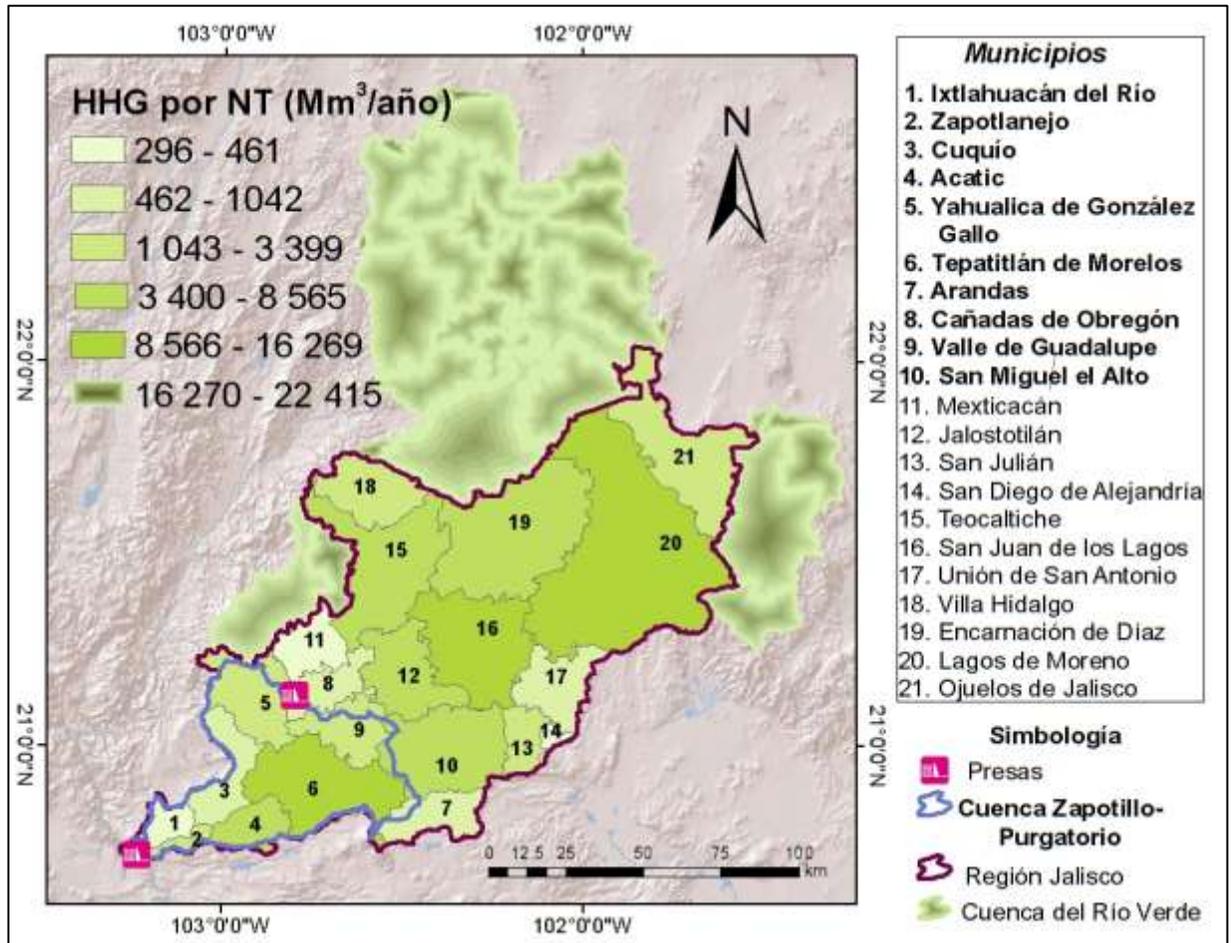


Figura 4.7. HHG por NT en los municipios que se encuentran en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco

En el mapa de la Figura 4.8 se presenta la tendencia de la HHG por PT obtenida para cada municipio de la Región Jalisco, las correspondientes a los municipios de Aguascalientes, Guanajuato, San Luis Potosí y Zacatecas (color azul jaspeado) se sumaron resultando una HHG por PT de 181 068 Mm³/año.

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

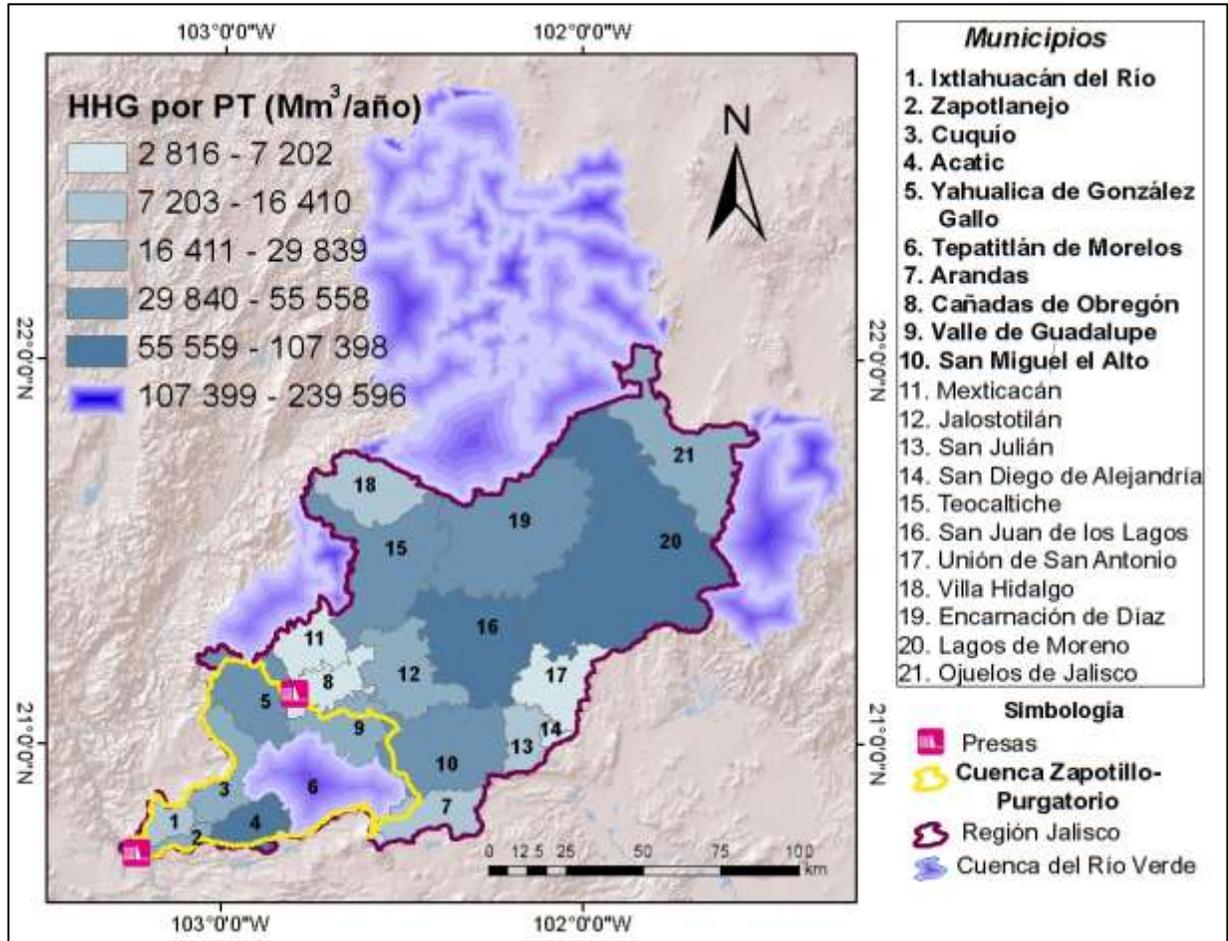


Figura 4.8. HHG por PT en los municipios que se encuentran en las regiones Cuenca Zapotillo-Purgatorio y Región Jalisco

Como se puede observar en la Tabla 4.7, la HHG por PT del municipio de Tepatlán de Morelos (No. 6) es la más grande con 239 595 Mm³/año. La razón de que éste municipio presente una HHG incluso mayor a la huella de la zona aguas arriba de la Región Jalisco (azul jaspeado) es que desarrolla una importante productividad pecuaria e industrial. Además, sus cargas de PT no serán retenidas en 75% por la presa *El Zapotillo*, por lo tanto se ve reflejado en su alto valor de HHG por PT.

Los municipios Acatic (No.4), Lagos de Moreno (No.20) y San Juan de los Lagos (No.16), presentan HHG por PT en un intervalo de 55 559 a 107 398 Mm³/año, lo cual indica que estos municipios también aportan considerablemente cantidades de PT al Río Verde. Debido a que los municipios Lagos de Moreno y San Juan de los Lagos se localizan

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

aguas arriba de la futura presa *El Zapotillo*, las cargas generadas por estos serán retenidas en el embalse disminuyendo sus cargas a la salida de la presa y por ende su HHG.

Al evaluar las HHG por municipios se puede observar que la retención de nutrientes en la presa *El Zapotillo* tiene como consecuencia positiva aminorar la aceleración de la condición eutrófica del Río Verde aguas abajo de la presa, sobre todo para el PT. Sin embargo, la capacidad del tramo del Río Verde entre las presas *El Zapotillo* y *Purgatorio* no tendrá el volumen suficiente para asimilar todos los aportes de NT y PT que se descargan dentro de la cuenca.

4.4. Evaluación de escenarios de reducción de HHG

Los resultados de la evaluación de los escenarios se presentan como el porcentaje de la relación entre la HHG estimada para cada uno de los escenarios y la $HHG_{\text{permisible}}$. Esta última se refiere al caudal de agua disponible que tendrá el tramo del Río Verde entre las presas *El Zapotillo* y *Purgatorio* siendo de $495 \text{ Mm}^3/\text{año}$ para los escenarios 1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio, 2. Región Jalisco, 3. Cuenca del Río Verde. 3.i.i. Cuenca del Río con atenuación natural y retención en la presa *El Zapotillo*. En el caso del escenario 3.i.i. Cuenca del Río Verde con atenuación natural, la $HHG_{\text{permisible}}$ se define como el caudal de agua generado en la cuenca sin la regulación de la presa *El Zapotillo* siendo de $786 \text{ Mm}^3/\text{año}$. El porcentaje $HHG/HHG_{\text{permisible}}$ puede considerarse como un indicador para determinar el grado de contaminación presentado mediante la HHG. Los valores mayores a 100% indican que la capacidad para asimilar los nutrientes así como los límites máximos del estado mesotrófico han sido rebasados, mientras que un valor igual a 100% señala que la capacidad de asimilar los contaminantes ha sido consumida, por lo que se busca llegar a valores inferiores a 100%. A continuación se describen los resultados para cada uno de los escenarios de reducción de HHG por NT, posteriormente los de HHG por PT.

En la Tabla 4.8 se resumen los resultados obtenidos de las HHG por NT para cada escenario. Los escenarios 3 y 3i.i. se estimaron considerando los aportes de nutrientes, de toda la cuenca del Río Verde, que llegarán a la presa *Purgatorio*. La diferencia entre ellos es que mientras que las HHG del escenario 3 se calcularon a partir de las estimaciones de

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

cargas de nutrientes del inventario de Corzo (2009), en el escenario 3.i.i las HHG se determinaron con las concentraciones de nutrientes medidas en la corriente del Río Verde. Esta comparación ayuda a comprender porque es importante considerar la atenuación natural en las estimaciones de cargas de nutrientes ya que en el escenario 3.i.i la reducción de la HHG fue de 4 veces menor que el valor de HHG del escenario 3.

Tabla 4.8 HHG/HHG_{permisible} por NT 50% y 77% de reducción pecuaria

Región	HHG/ HHG _{permisible} (%)	
	50%	77%
1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio	2 954	1 567
2. Región Jalisco	9 129	4 610
3. Cuenca del Río Verde	11 715	6 459
3.i. Cuenca del Río Verde con atenuación natural	168	88
3.i.i. Cuenca del Río Verde con atenuación y retención de nutrientes que tendrá la presa <i>El Zapotillo</i>	692	203

En la gráfica de la Figura 4.9 se observa que las HHG evaluadas con la reducción de 50% de las descargas pecuarias de nutrientes rebasan el límite permisible de 100% (HHG/HHG_{permisible}). Por otro lado las HHG determinadas con la reducción de 77% de las descargas pecuarias en los escenarios del 1 al 3 y 3.i.i., rebasan el límite permisible, no así el escenario 3.i. Esto significa que aunque en la presa *El Zapotillo* la retención de nutrientes es favorable para el ecosistema acuático aguas abajo, la disminución del caudal del Río Verde evitará alcanzar las condiciones mesotróficas, aun implementando acciones de reducción en las descargas pecuarias.

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

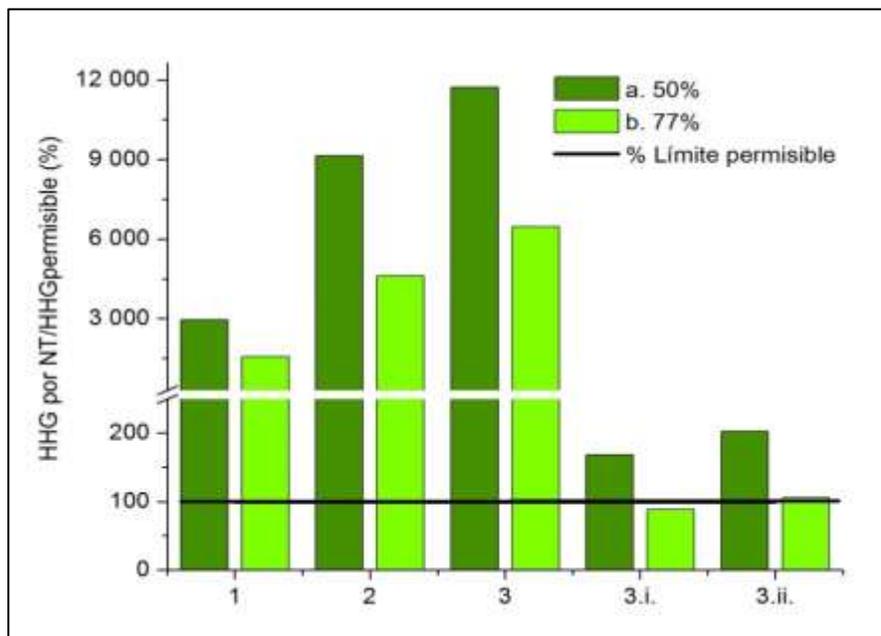


Figura 4.9. Relación HHG/HHG_{permisible} por NT con 50% y 77% de reducción de actividad pecuaria: 1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio, 2. Región Jalisco, 3. Cuenca del Río Verde, 3.i. Cuenca del Río Verde con atenuación y 3.ii. Cuenca del Río Verde con atenuación y retención en presa El Zapotillo

En la Tabla 4.9 se resumen los porcentajes obtenidos para cada escenario de reducción de HHG por PT. Al comparar los valores de las HHG por PT/HHG_{permisible} de los escenarios 3.i y 3.ii., se observa que, a diferencia de las HHG por NT, la presencia de la presa *El Zapotillo* será favorable a pesar de que el gasto del Río Verde aguas abajo de la presa será menor. Este beneficio se debe a la supuesta retención de PT de 75% de las cargas totales generadas.

Tabla 4.9. HHG/HHG_{permisible} por PT a) 50% de reducción, b) 77% de reducción

Región	HHG/ HHG permisible (%)	
	50%	77%
1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio	53 277	26 144
2. Región Jalisco	97 348	47 187
3. Cuenca del Río Verde	117 461	62 154
3.i. Cuenca del Río Verde con atenuación natural	2 372	1 189
3.ii. Cuenca del Río Verde con atenuación natural y retención de nutrientes en la presa <i>El Zapotillo</i>	2 241	1 124

[4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN]

En la gráfica de la Figura 4.10 se observa que las HHG por PT no alcanzan las HHG permisible aun considerando la atenuación natural, ya que la capacidad para asimilar cargas de PT del tramo del Río Verde entre las presas *El Zapotillo* y *Purgatorio* es por debajo de 6 t/año. Por lo tanto se recomienda tratar toda descarga que contenga fósforo.

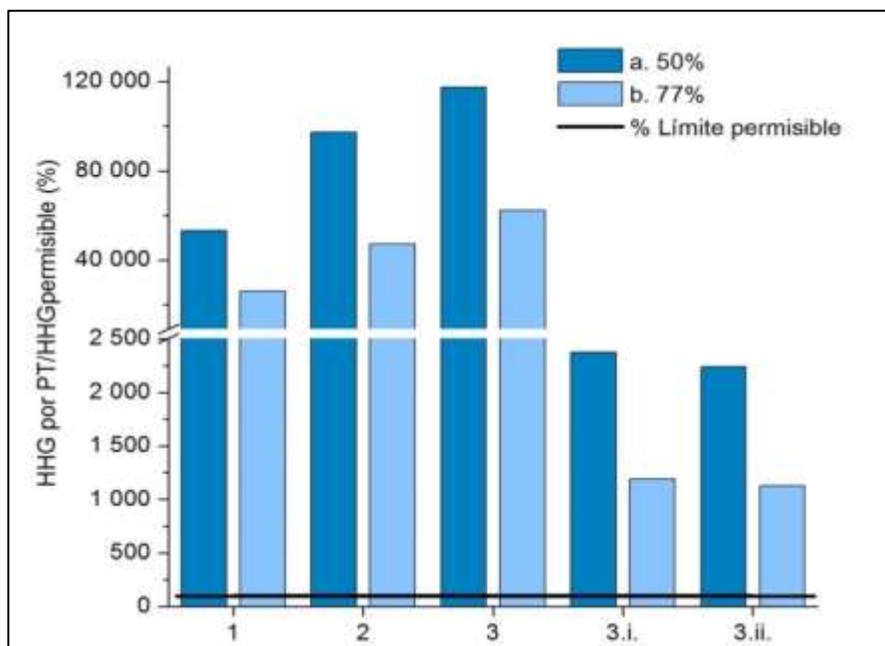


Figura 4.10. Relación HHG/HHG_{permisible} por PT con 50% y 77% de reducción de actividad pecuaria 1. Cuenca Zapotillo-Purgatorio, 2. Región Jalisco, 3 Cuenca del Río Verde, 3.i. Cuenca del Río Verde con atenuación y 3.i.i. Cuenca del Río Verde con atenuación y retención en presa El Zapotillo

5. Conclusiones

El presente trabajo de investigación logró cumplir con el objetivo general de determinar las HHG por NT y PT en la cuenca hidrológica del Río Verde con el fin de evaluar la capacidad del volumen de agua anual necesario para asimilar estos nutrientes del tramo de la cuenca entre las presas *Purgatorio* y *El Zapotillo* en términos de la condición trófica. Para la determinación de las HHG se consideró la retención de nutrientes provenientes aguas arriba de la presa *El Zapotillo*. Los resultados de HHG indican que aún con la retención, el caudal del tramo del Río Verde evaluado recibirá mayor cantidad de NT y PT de los que pueda asimilar si no se llevan a cabo reducciones de sus emisiones.

En la cuenca del Río Verde, no se cuenta con registros de concentraciones naturales (C_{nat}) de NT y PT sin la influencia de descargas de actividades antropogénicas, por lo que se propuso estimar estas C_{nat} a partir de coberturas de suelo hipotéticas de bosque y matorral, que es la vegetación nativa de la región. Estas coberturas se definieron en función de la precipitación pluvial y se extrapolaron al 100% de cobertura. Este método permitió obtener C_{nat} por debajo de los límites del estado mesotrófico sólo si se considera toda la cuenca del Río Verde.

Las HHG totales estimadas para NT y PT en la Cuenca del Río Verde son mayores que el flujo de agua anual disponible ($495 \text{ Mm}^3/\text{año}$), el cual corresponde al caudal que tendrá el tramo del Río Verde entre las presas *El Zapotillo* y *Purgatorio* una vez construidas. Esto indica que las cargas de NT y PT que llegarán al embalse *Purgatorio* están por encima de la capacidad del tramo del Río Verde para que pueda asimilarlas, lo cual tiene como consecuencia que esta presa presente condiciones eutróficas en un corto periodo iniciado su funcionamiento.

En el análisis de las HHG por fuente de nutrientes se observó que la HHG por NT es menor que la de PT a pesar de que la carga es mayor. Esto se debe a que la capacidad para asimilar al PT (determinada por la diferencia de $C_{m\acute{a}x}$ y C_{nat}) es mucho menor que para asimilar al NT. El predominio de la HHG de cada fuente contaminante depende de las

actividades antropogénicas realizadas en la región evaluada. En el caso de la cuenca del Río Verde la fuente de contaminación que contribuye más a la HHG, es la actividad pecuaria, sobre todo del ganado bovino, cuyas HHG por NT y PT en la cuenca del Río Verde son de 77 127 y 925 597 Mm³/año respectivamente. Estos son los volúmenes de agua que se van a contaminar cada año con los nutrientes. Al compararlos con los gastos del río se encuentra que se debe buscar estrategias para reducir las descargas de nutrientes principalmente de las descargas pecuarias.

En la evaluación de los escenarios de reducción de HHG se encontró que al considerar la atenuación natural y reduciendo 77% de las cargas pecuarias permitiría una HHG por NT por debajo del flujo disponible en la zona de estudio, alcanzando además, los límites del estado mesotrófico. No ocurre lo mismo para la HHG por PT. Para alcanzar el límite máximo permisible de HHG por PT, se recomienda evaluar el efecto de reducción en las descargas industriales y municipales y debido a las descargas de los diferentes usos de suelo.

En esta tesis se trabajó con inventarios de fuentes de nutrientes para la estimación de las HHG, además se consideró la retención de nutrientes en la presa *El Zapotillo*. Sin embargo, existen otras retenciones en suelo y cuerpos de agua o “atenuación natural”, que para el cálculo de la HHG no fueron consideradas. Para continuar esta línea investigación sobre HHG, se recomienda evaluar esta atenuación natural mediante la aplicación de modelos validados con resultados de muestreo en campo.

La retención de nutrientes se estimó con base en estudios previos en otra presa; se recomienda verificar esta retención una vez que entre en funcionamiento la presa *El Zapotillo*.

Bibliografía

- AgroDer, 2012. *Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica*, México, D.F.: WWF México y AgroDer.
- Aldaya, M. M., Llamas Madurga, M. R., Garrido, A. & Varela, C., 2008. Importancia del conocimiento de la huella hidrológica para la política española del agua. *Encuentros Multidisciplinares*, 10(29), pp. 1-12.
- Andalón, B. M. & Rodríguez, A. G., 2012. *Sistema de Información Estadística y Geográfica de Jalisco*. [En línea]
Available at:
<http://sieg.gob.mx/contenido/GeografiaMedioAmbiente/Cambiodeusodelsueloparaestudiodebiodiversidad.pdf>
[Último acceso: Octubre 2013].
- Areválo, D., Lozano, J. & Sabogal, J., 2011. Estudio nacional de huella hídrica del sector agrícola en Colombia. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, Volumen 7, pp. 101-126.
- Arévalo, U. D. & Campuzano, O. C., 2013. *Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce.- Resumen de resultados*, Antioquia, Colombia: Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquía.
- Arévalo, U. D., Lozano, J. & Sabogal, J., 2011. Estudio nacional de huella hídrica del sector agrícola en Colombia. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, Volumen 7, pp. 101-126.
- Arreguín, C. F., López, P. M., Marengo, M. H. & Tejeda, G. C., 2007. Agua Virtual en México. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII(4), pp. 121-132.
- AYMA, 2006. *Actualización y caracterización de fuentes de contaminación de la cuenca del Río Verde en el estado de Jalisco*. [En línea]
Available at: <http://www.ceajalisco.gob.mx/transparencia/1315-informes.html>
[Último acceso: Noviembre 2012].
- AYMA, 2011. *Monitoreo de floraciones algales en el Río Verde y en el área de proyecto de abastecimiento "Purgatorio" en el estado de Jalisco*, Guadalajara: Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA, Jalisco).
- Bavera, G. A., 2007. *Sitio argentino de producción animal*. [En línea]
Available at: http://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/invernada_o_engorda_a_corral_o_feedlot/44-

[estiercol.pdf](#)

[Último acceso: Enero 2014].

Bitton, G., 2005. *Wastewater Microbiology*. Tercera edición ed. New Jersey: John Wiley & Sons.

Bosco, J. I., Blanco, J. A. & Castillo, F. J., 2004. Gestion forestal y ciclos de nutrientes en el marco. En: V. F, ed. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiane*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, pp. 479-506.

Boulay, A. M., Arjen, Y. H. & Vionnet, S., 2013. Complementarities of water focused Life Cycle Assesment and Water Footprin Assessment. *Environmental Science & Technology*, Volumen 47, pp. 11926-11927.

Bravo, I. L., Saldaña, F. P., Izurieta, D. J. & Mijangos, C. M., 2013. *La importancia de la contaminación difuda en México y en el mundo*. [En línea]
Available at: <http://www.imta.gob.mx/historico/images/noticias/notas-tecnicas/importancia-contaminacion-difusa.pdf>

[Último acceso: Enero 2014].

Camargo, A. J. & Alonso, A., 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystem: A global assessment. *Environmental International*, 32(6), pp. 831-849.

Carmona, V. L., 2010. *Estimación de la huella gris de la agricultura teniendo en cuenta el efecto de fertilizantes y pesticidas*. Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya.

Carpenter, S. R. y otros, 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3), pp. 559-568.

Casado, R. R., A., G. C., Llamas, M. M. R. & Varela, O. C., 2008. *La huella hidrológica de la agricultura española*. Primera ed. Madrid: REALIGRAF, S.A..

CEA, J., 2011. *Estudio de Impacto Ambiental (MIA-R) para el sistema de abastecimiento a la Zona Conurbada de Guadalajara. Programa Integral de Abastecimiento*, Jalisco: Comisión Estatal del Agua de Jalisco.

Chávez, C. M. M. & Binnqüist, C. G. S., 2012. La huella hídrica agrícola en los Valles de Etna, Zimatlán y Tlacolula, Oaxaca.. *Sociedades Rurales. Producción y Medio Ambiente*, 12(23), pp. 15-50.

CNA, 2006. *Manifestación de Impacto Ambiental, modalidad regional del Proycto: Presa El Zapotillo, para Abastecimiento de Agua Potable a Los Altos de Jalisco y a la Ciudad de León, Gto.*, Jalisco: Comisión Nacional del Agua.

Comisión Nacional del Agua, 2011. *Estadísticas del agua en México, esdición 2011*, México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua, 2011. *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*, México, D.F.: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Comisión Nacional del Agua, 2012. *Atlas digital del agua México. Sistema Nacional de Información del Agua*. [En línea]

Available at: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/index.html>

[Último acceso: Julio 2013].

Corzo, J. C. E., 2009. *Contaminación de la cuenca del Arcediano y propuesta de Saniamiento*. México D.F.: Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cotler, A. H., Garrido, P. A. & Mondragón, B., 2007. *Delimitación de cuencas hidrográficas de México, a escala 1:250,000*, México: INEGI-INE-CONAGUA.

CTA, 2013. *Evaluación de la huella hídrica en la cuenca del río Porce*. Primera ed. Antioquía: CTA.

De Miguel, Á., Kallache, M. & García, C. E., 2012. CWUModel: A water balance model to estimate the water footprint in the Duero river basin. En: *Value of water research report series, N° 60*. Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education, pp. 39-58.

Deurer, M., Green, S. R., Clothier, B. E. & Mowat, A., 2011. Can product water footprints indicate the hydrological impact of primary production? -A case study of New Zeland kiwifruit. *Journal of Hydrology*, Volumen 408, pp. 2046-256.

Dumont, A., Gloria, S. & Llamas, R. M., 2013. The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: The case of Guadalquivir basin (Spain). *Water Resources and Industry*, 1(2), pp. 60-76.

EPA, 1996. *Guía del ciudadano: Atenuación natural, EPA 542-F-96-026*. [En línea]

Available at: <http://www.clu-in.org/download/remed/spannatt.pdf>

[Último acceso: Agosto 2014].

EPA, U., 2004. Wastewater Characterization. En: *Technical development document for the final effluent limitations guidelines and satandars for the meat and poultry products point source category (40 CFR 432)*. Washington D.C.: United States Environmental Proteccion Agency (EPAUS), pp. 1-22.

FAO, 1997. *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. [En línea]

Available at: <http://www.fao.org/docrep/w2598s/w2598s05.htm#eutrofización de las aguas superficiales>

[Último acceso: enero 2014].

FAO, 1999. *La caja de herramientas sobre ganadería y medio ambiente*. [En línea]

Available at:

<http://www.fao.org/ag/againfo/programmes/es/lead/toolbox/Tech/20ManMgn.htm#Tech>

[Último acceso: Enero 2014].

FAO, 2002. *Descubrir el potencial del agua para la agricultura*. [En línea]

Available at: <http://www.fao.org/docrep/006/y4525s/y4525s05.htm>

[Último acceso: Marzo 2013].

Farrell, B. C., 2013. *Diseño de una metodología para reportar la huella de agua*. México, D.F.: Tesis de doctorado en Ciencias e Ingeniería Ambiental. Universidad Autónoma Metropolitana.

Farrell, C., Turpin, S. & Suppen, N., 2011. Assessment of the water footprint of wheat in Mexico. *Towards Life Cycle Sustainability Management*, pp. 161-170.

Fraile, H., Orive, E. & Pozo, J., 1995. Evaluación del estado trófico y comparación de modelos relativos al fósforo en los embalses de Cerbadilla y Valparaíso (Río Tera, Zamora). *Limnética*, 11(2), pp. 29-37.

Franke, N. A., Boacioglu, H. & Hoekstra, A. Y., 2013. Grey water footprint. Tier 1 supporting guidelines. En: *Research Report Series No. 65*. Delf: UNESCO-IHE. Institute for Water Education, pp. 2-64.

Fundación MAPFRE, 2011. *Huella hídrica desarrollo y sostenibilidad en España*. Primera ed. Madrid: LUFERCOMP, S.L..

Gasque, G. R., 2008. *Enciclopedia bovina*, México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, FMVZ.

Gijzen, H. J. & Mulder, A., 2001. The nitrogen cycle out of balance. *Water*, Volumen 21, pp. 38-40.

Gómez, O. D., 2003. *Evaluación de impacto ambiental. Un instrumento preventivo para la gestión ambiental*. Segunda ed. Madrid: Ediciones Mundi- Prensa.

Hanrahan, G., 2012. *Key concepts in environmental chemistry*. USA: Elsevier Inc..

Hansen, A. M., León, Z. A. & Bravo, I. L., 1995. Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma-Chapala. *Ingeniería Hidráulica en México*, V(3), pp. 55-69.

Hansen, M. A. & Márquez, P. H., 2012. Procedimiento para evaluar cargas internas de nutrientes en cuerpos de agua. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), pp. 265-275.

Hoekstra, A. Y., 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, Volumen 68, pp. 1963-1974.

Hoekstra, A. Y., 2013. *The water footprint of modern consumer society*. Primera ed. Oxon: Routledge.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. & Mekonnen, M. M., 2009. *Water footprint manual- State of the art 2009*. Primera ed. Enschede(The Netherlands): Water Footprint Network.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M. & Mekonnen, M. M., 2011. *The water footprint assessment manual. Setting the global standar*. Primera ed. London- Washington D. C.: Earthscan.

INEGI, 2013. *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. [En línea]
Available at: <http://www.inegi.org.mx>
[Último acceso: 7 Junio 2013].

Jefferies, D. y otros, 2012. Water footprint and life cycle assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. *Journal of Cleaner Production*, Volumen 33, pp. 155-166.

Jones, D. D. & Sutton, A. L., 2003. *Design and operation of livestock waste lagoons. Agricultural and biological engineer*. [En línea]
Available at: <http://www.ces.purdue.edu/extremedia/ID/ID-120.html>

Liu, C., Kroeze, C., Hoekstra, A. Y. & Gerbens, L. W., 2012. Past and future trend in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world river. *Ecological Indicator*, Volumen 18, pp. 42-49.

Manahan, S. E., 2007. *Introducción a la Química Ambiental*. Primera ed. México D.F.: Reverté Ediciones.

Marquéz, P. H., Hansen, A. M. & Falcon, R. A., 2013. Phosphorous control in a eutrophied reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, Volumen 20, pp. 8446-8456.

Márquez, P. H., Hansen, M. A. & Falcón, R. A., 2013. Phosphorous control in a eutrophied reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, Volumen 20, pp. 8446-8456.

Martínes, H. J., 2010. *Propuesta para el manejo sustentable de residuos sólidos de origen pecuario (excretas de bovino) mediante un fdigesto anaeróbico*. Jalapa, Veracruz: Universida Veracruzana, Facultad de Biología.

Mayorga, E. y otros, 2010. Global nutrient export from watersheds 2 (NEWS 2): Model development and implementation. *Environmental Modelling & Software*, Volumen 25, pp. 837-853.

Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y., 2011. *National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption*. Value of Water Research Report Series No, 50 ed. Delft: UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y., 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrolog and Earth System Sciences*, Volumen 15, pp. 1577-1600.

Meybeck, M., 1982. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, Volumen 282, pp. 401-450.

Mijangos, 2013. *Recopilación de datos vectoriales de INEGI para el software Arc-Gis* [Entrevista] (Marzo 2013).

Montalván, E. A. y otros, 2010. Huella hídrica gris en industrial alimenticias camagüeyanas. *Revista Cubana de Química*, 22(2), pp. 44-50.

Moore, W. J., Stanitsky, L. C. & Jurs, C. P., 2008. *The molecular science*. Primera ed. USA: Cole, CEngage LArning.

Nebel, B. J. & Wrigh, R. T., 1999. *Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible*. s.l.:Pearson Educación.

OPS, 2007. *Evaluación de riesgos e impactos a la salud en la población de la ZCG por la construcción de la presa Arcediano.- Presentación del informe de la fase I*. [En línea] Available at: http://www.ceajalisco.gob.mx/images/ley_pdf/evaluacion_arcediano.pdf [Último acceso: Febrero 2014].

Padral, P., 2013. *Información de la tasa de crecimiento en cerdos* [Entrevista] (Agosto 2013).

Parada, P. G., 2012. El agua virtual conceptos e implicaciones. *Orinoquia*, 16(1), pp. 69-76.

Pinos, R. J. M. y otros, 2012. Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de Améroca. *Agrociencia*, Volumen 46, pp. 359-370.

Pucket, L. J., 1994. Nonpoint and point ssources of nitrogen in major watersheds of the United States. *U.S. Geological Survey*, 94(4001), pp. 1-12.

Ramalho, R. S., 1993. *Tratamiento de aguas residuales*. s.l.:Reverté S. A..

Ramírez, Z. J. A. y otros, 2010. Changing water, phosphorus and nitrogen budgets for Valle de Bravo reservoir, water supply for Mexico City Metropolitan Area. *Lake an Reservoir Management*, Volumen 26, pp. 23-34.

Redfield, A. C., 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, Volumen 46, pp. 205-221.

REPDA, 2013. *Información de REPDA para las cuencas hidrológicas Santiago y Río Verde*, México, D.F.: CONAGUA.

Roldán, P. G. & Ramírez, R. J. J., 2008. *Fundamentos de la limnología neotropical*. Colombia: Universidad de Antioquia.

Ryding, S.-O. & Rast, W., 1989. *The control of eutrophication of lakes and reservoirs*. Primera ed. New Jersey: UNESCO, Paris.

SAGARPA, 2012. *Anuarios agropecuarios*. [En línea]
Available at:
http://infosiap.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=261&Itemid=429
[Último acceso: Julio 2013].

SAGARPA, 2012. *Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas*, México, D.F.: Colegio de Postgraduados.

SAGARPA, 2012. *Manual de buenas prácticas pecuarias en el sistema de producción de ganado productor de carne en confinamiento*. [En línea]
Available at:
<http://www.sagarpa.gob.mx/ganaderia/Publicaciones/Paginas/ManualesdeBuenasPracticas.aspx>
[Último acceso: diciembre 2013].

Salas, H. J. & Gualberto, L., 1986. *Memoria del tercer encuentro del proyecto regional desarrollo de metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales*, Guadalajara, México: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)- Comisiopn del Plan Nacional Hidraulico (SARH).

Salas, H. J. & Martino, P., 2001. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)*, Volumen OPS/CEPIS/PUB/01, pp. 1-63.

Salazar, G. G. & Cuarón, I. J. A., 1997. *FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)*. [En línea]
Available at: <http://www.fao.org/ag/aga/agap/frq/APH134/cap8.htm>
[Último acceso: Enero 2014].

Samoral, G. y otros, 2011. *Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir*. Primera ed. s.l.:Fundación Botín.

Sawyer, C. N., L. M. P. & Parkin, G. F., 2001. *Química para ingeniería ambiental*. Cuarta ed. s.l.:Mc Graw Hill.

Seitzinger, S. P. y otros, 2010. Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(GB0A08), pp. 1-16.

SEMARNAT, 2006. *La gestión ambiental en México*. México, D.F.: Delmo Comunicaciones, S.A de C.V..

SIATL, 2012. *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas Versión 2.1*. [En línea] Available at: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/ [Último acceso: Noviembre 2012].

Sotelo, N. A. J. y otros, 2011. *Huella hídrica, desarrollo y sostenibilidad en España*. Primera ed. Madrid: Fundación Mapfre.

Taiganides, P. E., Pérez, E. R. & Girón, S. E., 1996. *Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México*. Primera ed. México, D.F.: Consejo Mexicano de Porcicultura.

UGREJ, 2006. *Union Ganadera Regional del Estado de Jalisco. Organización no lucrativa al servicio de los ganaderos*. [En línea] Available at: http://www.ugrj.org.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=394&Itemid=138 [Último acceso: Noviembre 2013].

Van Oel, P. R., Mekonnen, M. M. & Hoekstra, A. Y., 2009. The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. *Ecological Economics*, Volumen 69, pp. 82-92.

Vanham, D. & Bidoglio, G., 2013. A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicator*, Volumen 26, pp. 61-75.

Vanham, D. & Bidoglio, G., 2013. A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, Volumen 26, pp. 61-75.

Viessman Jr., W. & Lewis, G. L., 2003. *Introducción to Hydrology*. Quinta ed. s.l.:Prentice Hall. Pearson Education, Inc..

Weiner, E. R., 2008. *Applications of environmental aquatic chemistry*. Segunda ed. EUA: CRC Press.

Welch, E. B., Jacoby, J. M. & Lindell, T., 2005. *Pollutant effects in freshwater applied limnology*. Tercera ed. New York: Taylor & Francis e-Library.

Wetzel, R. G., 2001. *Limnología*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A..

WHO/Europea, 2002. *Eutrophication and health*, s.l.: s.n.

Zeng, Z. y otros, 2012. Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Science*, Volumen 16, p. 2771–2781.

I. Anexo

Análisis de la concentración de NT y PT sobre la corriente del Río Verde en la región Cuenca Zapotillo-Purgatorio

Para el presente trabajo se efectuó un muestreo en época de estiaje en ocho sitios a lo largo del tramo del río Verde que va desde el Zapotillo a la confluencia con el Santiago. El fin fue determinar las concentraciones de NT y PT, así como hacer un reconocimiento de la zona de estudio. En el siguiente mapa se observan los sitios de muestreo que también corresponden a la zona de estudio de la Cuenca Zapotillo-Purgatorio.



Figura I.1. Ubicación de los sitios de muestreo

Determinación de la huella hídrica gris por las cargas de nitrógeno y fósforo en un cuerpo de agua

En las gráficas de las Figura I.2 y Figura I.3 se observa que en los seis sitios de muestreo tanto las concentraciones de NT como las de PT son mayores a los límites máximos del estado mesotrófico, por lo que las condiciones actuales del Río Verde son eutróficas.

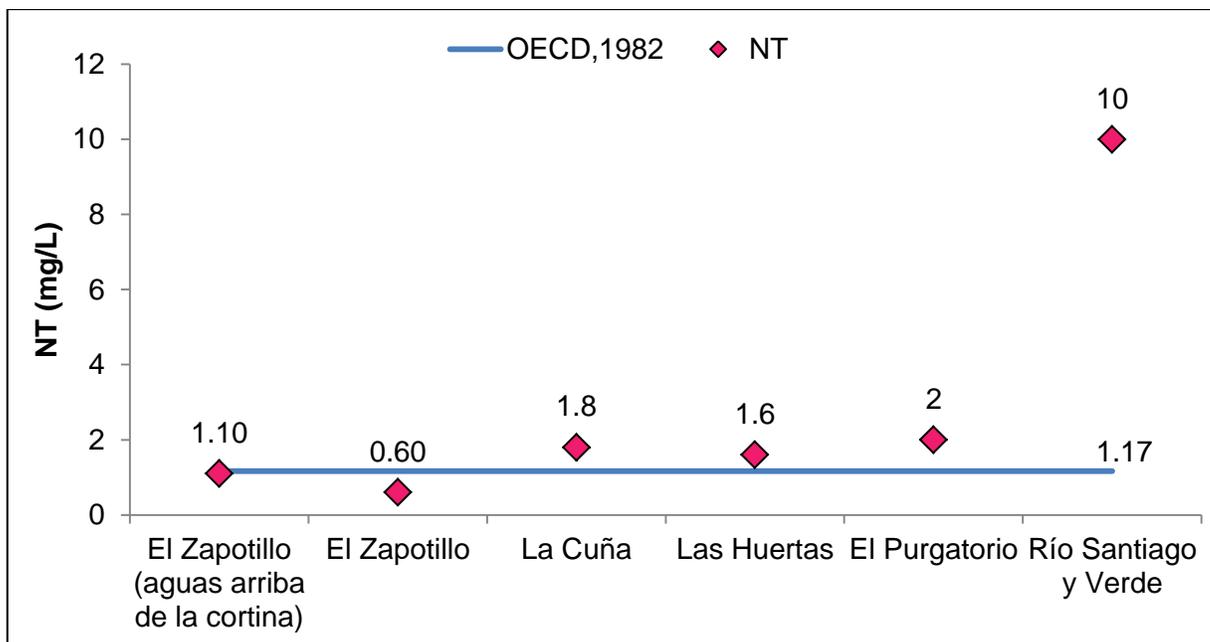


Figura I.2. Tendencia aguas arriba hacia aguas debajo de las concentraciones de nitrógeno total sobre la corriente del Río Verde

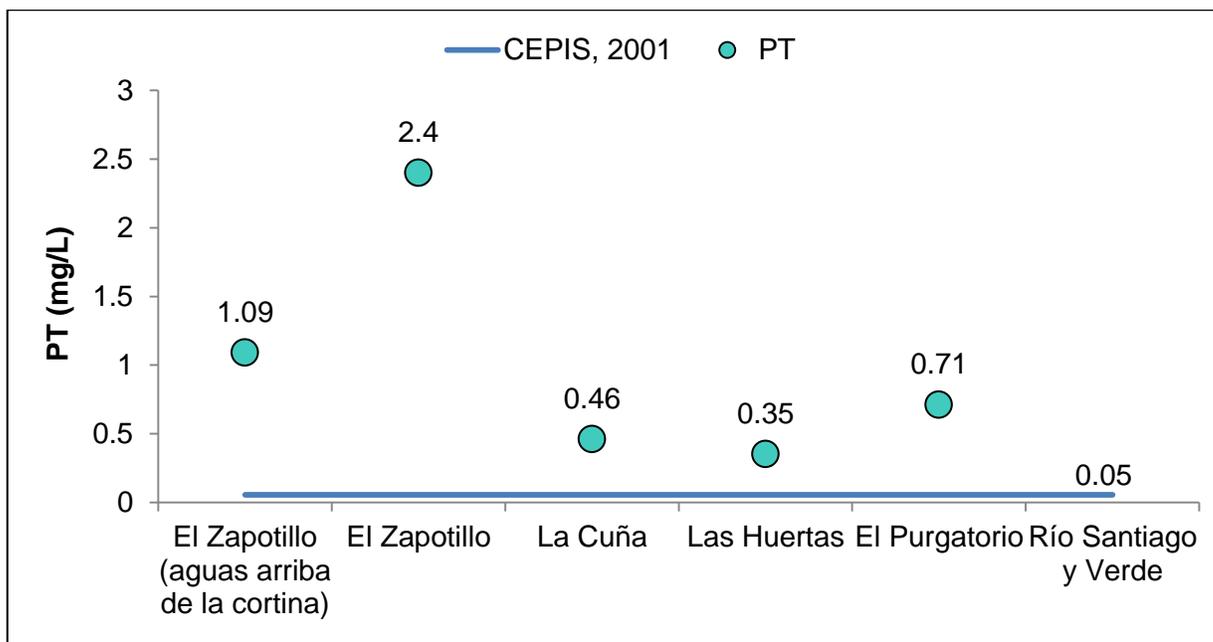


Figura I.3. Tendencia aguas arriba hacia aguas abajo de las concentraciones de fósforo total sobre la corriente del Río Verde

Con el análisis de las concentraciones de NT y PT se observa que la cantidad de nutrientes en el río Verde son mayores a los límites del estado eutrófico, por lo que no es conveniente utilizar la concentración del río como la natural para el cálculo de la HHG. Por esta razón fue necesario proponer un método para estimar la concentración natural.

II. Anexo

Estimación de concentraciones de NT y PT generadas en la ganadería bovina

Las cargas de NT y PT del inventario desarrollado por Corzo (2009), se estimaron a partir de la producción bovina obtenida en la base de datos de INEGI de 2008 y las concentraciones de NT y PT generadas por peso del animal (Tabla 2.1). En dicho inventario se utilizó los promedios tanto del peso animal como de las concentraciones de nutrientes. En esta investigación se determinó los pesos promedio del animal vivo (capítulo 3.2) por lo que fue necesario estimar las concentraciones de NT y PT para estos pesos.

Tabla II.1. Concentraciones de nutrientes en excretas bovinas. Recopilado por Corzo (2009)

Ganado	Peso animal (kg)	Estiércol (kg/día)	NT (g/día)	PT (g/día)
Bovino de leche	68	5	27	10
	113	9	45	20
	227	18	91	37
	453	36	186	75
	634	51	258	105
Bovino de carne	227	18	77	57
	453	36	154	133
	340	27	118	86
	567	45	195	144

A partir de las gráficas NT vs peso y PT vs peso para cada tipo de ganado (Figura II.1 y Figura II.2), se obtuvieron las ecuaciones para calcular las concentraciones de nutrientes en función del peso del animal. En la Tabla II.2 se muestran estas ecuaciones por tipo de ganado.

Determinación de la huella hídrica gris por las cargas de nitrógeno y fósforo en un cuerpo de agua

Tabla II.2. Ecuaciones para estimar la concentración de nutrientes con respecto al peso del animal

Ganado	NT (g/día)	PT (g/día)
Bovino de leche	$NT = 0.409 (Peso) - 1.0878$	$PT = (Peso) + 0.2664$
Bovino de carne	$NT = 0.3437 (Peso) - 0.3684$	$PT = 0.2712 (Peso) - 2.4555$

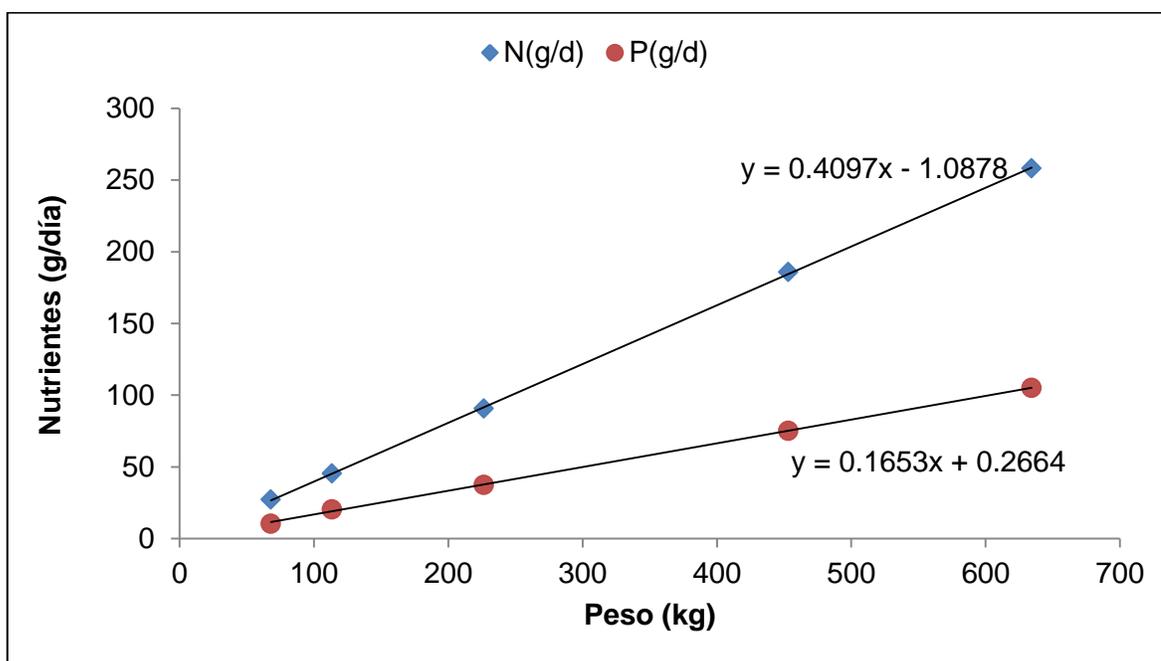


Figura II.1. Correlación de concentración de nutrientes en función del peso de bovino de leche

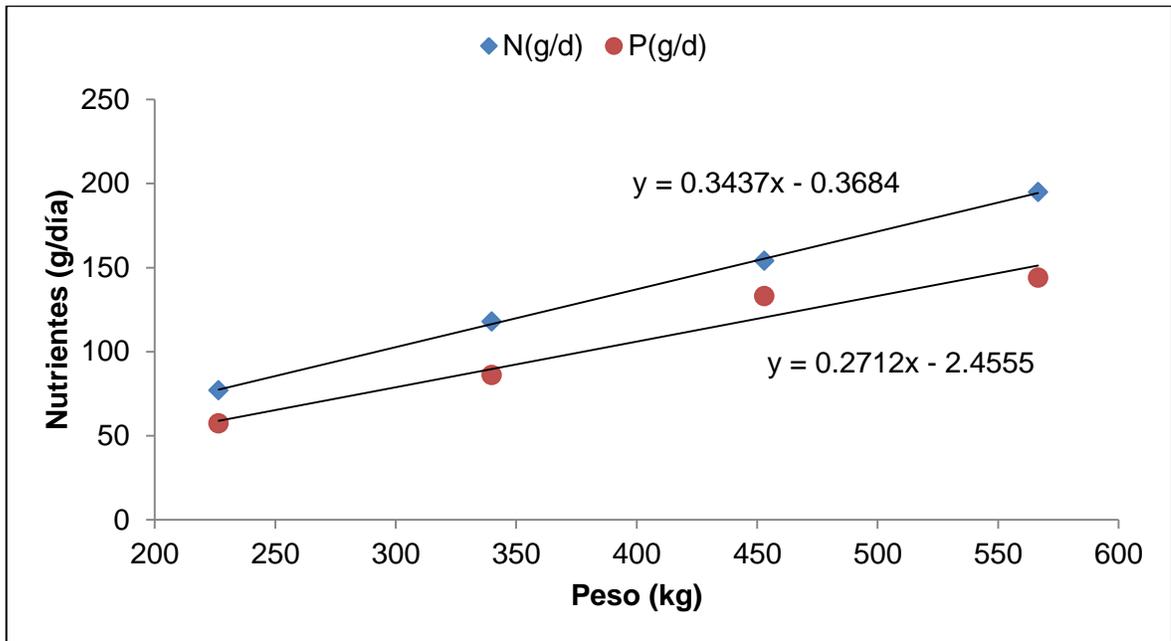


Figura II.2. Correlación de concentración de nutrientes en función del peso de bovino de carne

III. Anexo

Retención de nutrientes en la presa El Zapotillo

Para fines de este trabajo se utilizó información de la presa Valle de Bravo sobre la remoción de nutrientes para estimar la retención que se tendría en la futura presa El Zapotillo, no obstante, se recomienda verificar esta retención una vez que entre el funcionamiento.

Para la presa Valle de Bravo, se tiene registrado datos de concentraciones de N y P tanto de su embalse como de la cuenca. Estas concentraciones se utilizaron para determinar el porcentaje de retención de estos nutrientes a través de la Ecuación (III.1).

$$\% \text{ Retención} = \frac{C_{\text{cuenca}} - C_{\text{embalse}}}{C_{\text{cuenca}}} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Donde %Retención es el porcentaje de nutriente que se queda retenido en el sedimento; C_{cuenca} es la concentración anual de nutrientes que entra al embalse de la cuenca del Valle de Bravo; C_{embalse} es la concentración de nutrientes disueltos en el embalse

En la Tabla III.1 se resume las concentraciones de nutrientes de dos estudios realizados en la presa Valle de Bravo.

Tabla III.1 Concentración de N y P de la presa Valle de Bravo.

Citas	Concentración anual (mg/L)				Remoción (%)	
	Cuenca		Embalse		N	P
	N	P	N	P		
Márquez et al., 2013	245	65	202	19	18	71
Ramírez et al., 2010	591	120	319	26	46	78
Promedio					32	75