



**TESINA PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIADO EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

EFFECTOS DE LA FORESTACIÓN SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA: DESDE UNA VISIÓN GLOBAL A UNA LOCAL

Lucía Cabrera

Orientadora: Dra Mariana Meerhoff

Profesor Adjunto, G3 DT. Departamento de Ecología y Gestión Ambiental, Centro Universitario de la Región Este, UDELAR

Co-Orientador: Dr Iván González-Bergonzoni

Investigador asistente G3. Laboratorio de Etología, Ecología y Evolución Instituto de Investigaciones Biológicas Dr. Clemente Estable. MEC. Investigador posdoctoral. Departamento de Ecología y Evolución, Facultad de Ciencias, UDELAR

Facultad de Ciencias-CURE Maldonado-Universidad de la República

Noviembre, 2016

TABLA DE CONTENIDO:

	Página .
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
1 INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 MARCO TEÓRICO.....	5
1.2 ANTECEDENTES.....	6
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	7
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	10
1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.5 PREGUNTAS A RESPONDER.....	10
1.6 HIPÓTESIS.....	11
1.7 PREDICCIÓNES.....	12
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
2.1 OBJETIVO 1: Meta-análisis.....	12
2.1.1 BÚSQUEDA DE DATOS.....	12
2.2 OBJETIVO 2: Estudio de microcuencas pareadas en Uruguay	13
2.2.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	13
2.2.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA.....	15
2.3 ANÁLISIS DE DATOS.....	16
2.3.1 OBJETIVO 1: Meta-análisis.....	16
2.3.2 OBJETIVO 2: Estudio de microcuencas pareadas en Uruguay	16
3 RESULTADOS	18
3.1 OBJETIVO 1: Meta-análisis.....	18
3.2 OBJETIVO 2: Estudio de microcuencas pareadas en Uruguay	22
4 DISCUSIÓN.....	33
4.1 OBJETIVO 1: Meta-análisis.....	33
4.2 OBJETIVO 2: Estudio de microcuencas pareadas en Uruguay	36
5 CONCUSIONES Y PERSPECTIVAS.....	39
6 BIBLIOGRAFÍA.....	41
7 ANEXO I.....	46

AGRADECIMIENTOS:

Muchas personas me han ayudado, de una u otra forma, a la realización de este trabajo, a todas ellas quiero expresar mi agradecimiento.

En principio agradezco a PEDECIBA GEOCIENCIAS por la gran oportunidad que me dio con la beca de iniciación a la investigación, que sin ella nada de esto hubiera sido posible.

En forma especial, quiero agradecer a mi tutora y mi co-tutor: Dra Mariana Meerhoff y Dr Iván Gonzalez-Bergonzoni por su gran apoyo y buena orientación en la realización de este trabajo.

Agradezco también al tribunal que dedicó su tiempo a corregir mi tesis, Dr Nicolás Vidal, Dr Javier García Alonso y Dr Guillermo Chalar. Muchas gracias por los aportes y la ayuda que me brindaron.

A todo el grupo de investigación del CURE Maldonado, en especial a Claudia Fosalba, Franco Teixeira de Mello y Claudia Simón.

Resumen

La forestación se ha convertido en una actividad con creciente desarrollo a nivel global, ya que desde el 2005 al 2010 se incrementó el área forestada a una tasa de 4,2 millones de ha/año. La intensificación de la actividad forestal ha generado y acelerado el proceso de ingreso de nutrientes y materia orgánica a los cuerpos de agua continentales y, en ciertos casos y regiones, contribuye a detrimentos en la calidad y cantidad de agua y al proceso de eutrofización. Los estudios de estos cambios son de gran interés, ya que además de afectar a los ecosistemas, en última instancia repercuten en nuestra calidad de vida.

El objetivo de este trabajo consistió en analizar los efectos de la forestación sobre la calidad del agua de dos maneras distintas:

- a. Se analizó la literatura científica internacional para relevar la cantidad de estudios existentes y sus características, y evaluar los efectos de la forestación sobre la calidad de agua en arroyos a nivel global, mediante un meta-análisis.
- b. Se analizaron los efectos de la forestación sobre la calidad del agua en cuatro arroyos de bajo orden del Uruguay, mediante la comparación de microcuencas pareadas (dos microcuencas con arroyos asociados a una forestación versus dos microcuencas con arroyos que no tienen una forestación cercana y están dominadas por paisaje de pradera), evaluando cómo fluctúan temporalmente los parámetros estudiados y en relación a variables meteorológicas.

Concluyendo, a nivel internacional no se detectaron grandes cambios en la calidad de agua en arroyos cercanos a forestaciones, salvo en la concentración de sodio y aluminio (siendo Al^{3+} mayor en las cuencas forestales y Na^+ en las de pastura); aunque son escasos los estudios de calidad de agua en cuencas pareadas. También se sugiere que los efectos de la forestación en la calidad de agua son altamente dependientes de las condiciones ambientales locales, en particular del suelo. A su vez, en el estudio realizado en microcuencas del Uruguay, se observó un aumento de la concentración de un nutriente (fósforo) en los arroyos con forestación respecto a los arroyos no forestados en eventos de precipitaciones

voluminosas, lo cual podría indicar que existen algunos efectos de la forestación sobre la calidad de agua de arroyos y que éstos varían según las condiciones meteorológicas.

1) Introducción

1.1) Marco Teórico

Desde la década de 1950, se aceleraron tanto el crecimiento de la población humana como muchas actividades realizadas con la finalidad de resolver rápidamente las demandas crecientes de necesidades básicas y de consumo general. Como consecuencia, se han profundizado los impactos antrópicos sobre los ecosistemas de todo el planeta (Millennium Ecosystem Assessment 2005). Se ha elegido el término Antropoceno para referirse a la etapa geológica actual del planeta Tierra, en la que emergen un conjunto de cambios y actividades que dejan registros (e.g. en los anillos de crecimiento de árboles longevos) (Duarte et al., 2006) de que se están acelerando los cambios globales en períodos muy cortos con respecto a la historia del planeta, dando como resultado un cambio en la estructura y el funcionamiento de prácticamente todos los tipos de ecosistemas del mundo (Vitousek, 1994; Millennium Ecosystem Assessment, 2005), el clima y la composición química de la atmósfera, entre otros (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Los estudios de los cambios globales, tales como los cambios en el ciclo del agua, en el ciclo del nitrógeno, en las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y en los usos del suelo (Duarte et al., 2006), son de gran interés a nivel académico y de gestión, ya que además de afectar a los ecosistemas, dichos cambios repercuten en nuestra calidad de vida actual y futura y esto crea una necesidad de entender su funcionamiento. Uno de los impactos más importantes es el cambio en el uso del suelo a nivel mundial (Vitousek, 1994; Baldi et al., 2008). Este término refiere a la modificación de los usos de la tierra llevada a cabo a través de la remoción de los ecosistemas originales;

generalmente reemplazándolos por plantaciones de especies vegetales exóticas con fines comerciales, en particular los cultivos agrícolas y las plantaciones forestales; o por urbanización. Estas actividades representan una amenaza para la biodiversidad y conservación de los ecosistemas en general, incluyendo los cuerpos de agua continentales y costeros (Farley et al., 2005; Miserendino et al., 2011).

Durante el último siglo, en muchos lugares del mundo se ha estimulado la transformación de la vegetación natural hacia plantaciones forestales comerciales con especies de rápido crecimiento, a través de distintos incentivos económico-políticos (Farley et al., 2005; Jobbágy et al., 2006). Este cambio de uso del suelo se ha convertido en una actividad emergente a nivel global (Baldi et al., 2008), extendiéndose a una tasa de más de 3,6 millones ha/año, desde 1990 a 2000; 5,6 millones de ha/año los 5 años siguientes y desde 2005 a 2010 se incrementó a una tasa de 4,2 millones de ha/año (FAO, 2010).

Sudamérica presenta una de las tasas más altas de crecimiento de esta actividad, con 509.000 ha de nuevas forestaciones que se incorporan cada año desde el año 2000 (Baldi et al., 2008; FAO, 2010). La intensificación de la actividad forestal ha generado y acelerado el proceso de ingreso de nutrientes y materia orgánica desde las cuencas a los cuerpos de agua continentales (Jobbágy & Jackson, 2003; Farley et al., 2005; Jackson et al., 2005), y en ciertos casos y regiones, contribuye a detrimentos en la calidad y cantidad de agua, y al proceso de eutrofización (i.e. enriquecimiento artificial de nutrientes en el agua) (Ormerod et al., 1989; Quinn & Stroud, 2002; Oyarzun & Huber, 2003; Noretto, 2007; Wagner, 2008).

1.2) Antecedentes

La forestación ha aumentado en gran medida en los últimos años también en Uruguay. La promulgación de la Ley Forestal N° 15.939 (Anexo I), publicada en 1987, dio lugar a un amplio desarrollo de esta actividad (Silveira et al., 2006). El crecimiento registrado entre 1990 y 2012 fue de tal magnitud, que se pasó de aproximadamente 45.000 hectáreas a 1.000.000 hectáreas forestadas, de las

cuales 675.000 son *Eucalyptus* spp (DIEA-MGAP, 2013). La sustitución de los pastizales por plantaciones forestales puede generar, potencialmente, una gran pérdida de biodiversidad, ya que las praderas naturales poseen el 80% de las especies vegetales de Uruguay y presentan una gran riqueza de fauna asociada (Pérez-Arrarte, 2007).

Conjuntamente con procesos tales como la tala de monte nativo de las riberas y la contaminación por agroquímicos provenientes de tratamientos de los cultivos forestales (e.g. fertilizantes, pesticidas, herbicidas y fungicidas), se realizaron estudios regionales que han encontrado que en los terrenos forestados existen varios efectos que modifican el caudal y la calidad de agua de los recursos acuáticos (Jobbágy et al., 2006). A finales del año 1998 en Uruguay se iniciaron los primeros proyectos de investigación sobre efectos de las plantaciones forestales sobre el ciclo hidrológico (Silveira et al., 2006).

1.3) Justificación

Uno de los efectos más estudiados de las plantaciones forestales a nivel internacional es el de los cambios en el ciclo hidrológico, en particular, de la evapotranspiración. Muchos estudios indican una disminución en el rendimiento hídrico en cuencas que originalmente eran pastizales y fueron forestadas (Farley et al., 2005). La evapotranspiración en cuencas plantadas con *Eucalyptus* spp puede llegar a ser 40-250 mm mayor que en cuencas con pasturas (Zhang et al., 1999).

También se han estudiado los efectos de la forestación sobre las aguas subterráneas. Estos estudios revelan que bajo bosques establecidos en paisajes de pastizal descienden los niveles de la napa freática (Nosetto, 2007). En situaciones en las que la napa freática se encuentra cercana a la superficie, los árboles pueden aprovecharla y al hacerlo provocar la salinización de suelos y napas (Jobbágy & Jackson, 2004; Ballesteros, 2006).

Los efectos de la forestación sobre la cantidad de agua han sido ampliamente estudiados y comprobados en su mayoría (Brown et al., 2005;

Jobbágy et al., 2006; Zhang et al., 2008), sin embargo, los efectos de la forestación sobre la calidad del agua superficial en las cuencas y en particular sobre la biota acuática no han sido tan estudiados.

Tomando estudios científicos en cuencas pareadas de distintas regiones del mundo (con clima y tipo de suelo distintos), se encuentran resultados contradictorios con respecto a cómo afecta la forestación a la calidad de agua: Quinn & Stroud, (2002), y Márquez et al., (2015), presentaron resultados con conclusiones similares: los arroyos con forestaciones cercanas tienen menor calidad del agua (aumentando la acidez en las mismas). Sin embargo, otros estudios como Cooper & Thomsen (1988) y Miserendino & Masi (2010), obtuvieron que en arroyos cercanos a forestaciones no se encuentran cambios en el pH.

No obstante, si bien no hay consenso sobre los efectos sobre la calidad del agua, hasta el momento existe un cierto consenso en la comunidad científica en cuanto a los efectos de la forestación sobre el suelo. En ciertos casos (dependiendo del clima, tipo de suelo y de la intensidad del pastoreo en la pradera de las cuencas pareadas usadas en las comparaciones), las plantaciones forestales acidifican el suelo (Alfredsson et al., 1998; Jobbágy & Jackson, 2003; Jackson et al., 2005), y se sostiene que también se puede llegar a acidificar el agua de los ecosistemas acuáticos de las cuencas que ocupan (Jobbágy et al., 2006).

Con relación a estudios sobre efectos en el suelo, existe una transferencia de calcio, magnesio y potasio desde el suelo hacia la biomasa vegetal de las plantaciones de eucaliptos, la misma (en ciertos casos dependiendo del tipo de suelo y del clima) es acompañada por una liberación recíproca de sodio (Na^+) intercambiable y aluminio (Al^{3+}) al suelo, sustituyendo el calcio por los hidrogeniones asociados a estos elementos, causando una disminución en el pH de los suelos forestados (Marschner, 1995, Jobbágy & Jackson, 2003). El calcio es un elemento que se encuentra en bajas cantidades en los tejidos de las gramíneas y otras plantas herbáceas, pero en abundantes cantidades en los tejidos de especies leñosas angiospermas, como las usadas en las plantaciones (Jobbágy &

Jackson, 2004). En un estudio realizado en 2005 con 112 cuencas distribuidas en los cinco continentes, se encontró que los suelos con forestación se han vuelto más ácidos: en promedio las plantaciones forestales tuvieron 0.3 unidades de pH menos que los suelos con pastizales; y a su vez, los cultivos de eucaliptos han generado caídas de pH significativamente más fuertes que los cultivos de pinos (Jobbágy et al., 2006).

Otro de los efectos que se ha encontrado a nivel internacional, según el estudio de Jackson et al. (2005), es que en algunas circunstancias ha disminuido la fertilidad de los suelos forestados, conjuntamente con el contenido de materia orgánica, generando cambios irreversibles en la textura y estructura de los suelos.

Además del clima, la geología y los usos del suelo que se llevan a cabo en la cuenca, como la forestación, el funcionamiento de los ecosistemas fluviales se encuentra determinado por la topografía, las propiedades físico-químicas de sus aguas, la diversidad de microhábitats en cada cuerpo de agua en particular y la estructura de sus comunidades biológicas (Wetzel, 2001). Especialmente, la cabecera de la cuenca cumple un rol ecológico muy importante, y cualquier alteración del territorio y de la cantidad y calidad de las aguas, tiene el potencial de modificar los flujos existentes y potencialmente las características del agua y de la biota en la cuenca alta, media y baja (FAO, 2000; Machin et al., 2005; Allan & Castillo, 2007), potencialmente afectando el funcionamiento de todo el ecosistema.

La forestación, junto con otros usos del suelo que se han intensificado en los últimos años en el Uruguay, genera preocupación en gran parte de la sociedad respecto a sus impactos sobre los recursos naturales afectados, en especial el recurso agua (e.g. Diario El Observador, 10/5/2016). Uruguay es un país de recursos acuáticos superficiales abundantes, pero de calidad actualmente comprometida en muchos lugares (e.g. Chalar et al., 2010). En un informe que se le presentó a la población del Uruguay en el 2015 se plantea que la calidad de agua superficial se encuentra en un estado muy frágil: "Si bien el agua en Uruguay es abundante, su disponibilidad con determinado nivel de calidad para ciertos usos, como el agua potable (con un nivel tecnológico dado), está llegando a sus límites" (Oficina de Planeamiento y Presupuesto, 2015). El deterioro de la calidad

del agua superficial en varios puntos del Uruguay, y las crecientes dificultades en su potabilización (UDELAR, 2013), le imponen a la sociedad la necesidad de incrementar los esfuerzos en investigación y fortalecer la gestión del recurso con el fin de garantizar los distintos usos, y bienes y servicios que generan estos ecosistemas. Es por esta razón que es importante estudiar los efectos de la forestación sobre los cursos de agua, tanto a nivel local como a nivel global. En particular, en el Uruguay existen muy pocos estudios de los efectos de la forestación sobre la calidad de agua (e.g. Wagner, 2008).

1.4) Objetivo General

El objetivo de este trabajo es analizar los efectos de la forestación sobre la calidad del agua en arroyos de bajo orden.

1.4.1) Objetivos específicos

- 1) Analizar la literatura científica internacional para relevar la cantidad de estudios existentes y sus características (e.g. ubicación, año de publicación, etc.) y evaluar los efectos de la forestación sobre la calidad de agua en arroyos a nivel global, mediante un meta-análisis.
- 2) Analizar los efectos de la forestación sobre la calidad del agua en arroyos de bajo orden del Uruguay, mediante la comparación de cuatro microcuencas pareadas (dos microcuencas con arroyos asociados a una forestación versus dos microcuencas con arroyos que no tienen una forestación cercana y están dominadas por paisaje de pradera), evaluando cómo fluctúan temporalmente los parámetros estudiados y en relación a variables meteorológicas (e.g. precipitación).

1.5) Preguntas a responder:

- 1) A nivel global: ¿Cuánta importancia se le da al estudio del efecto de la forestación en la calidad del agua? ¿Existe algún sesgo geográfico en la

información publicada de estos estudios? ¿Qué duración tienen estos estudios? ¿En qué variables se centran?

- 1) Al hacer un meta-análisis global: ¿Se comprueban impactos negativos de la forestación sobre la calidad de agua? ¿Se logra ver algún patrón de cambio en la calidad de agua comparando arroyos con cuencas forestadas y arroyos con cuencas de pradera?
- 2) En el estudio de campo: ¿Se encuentra alguna diferencia en la calidad de agua entre ambas microcuencas pareadas? ¿Se ven diferencias en los diferentes muestreos a lo largo del año?

1.6) Hipótesis:

- 1) A escala global:

Los estudios del efecto de la calidad de agua asociado a la forestación se dan en todas partes del mundo en similar magnitud y por lo tanto no se va a encontrar un sesgo geográfico.

Tanto a escala global como a escala local, se espera que:

- 1) Los cursos de agua en cuencas forestadas aumenten su acidez respecto de cursos en cuencas similares no forestadas. Esto se debe a que el aporte de materia orgánica, como ramas y hojas provenientes de pinos o eucaliptus, acidifica el suelo en la cuenca y a que partículas de suelo y material asociado (así como también el agua que escurre por el suelo forestado) son arrastradas superficialmente hacia los cursos de agua, y también puede deberse a que por el cambio de uso de suelo, los árboles tienden a disminuir el calcio disponible en el suelo lo que provoca una reducción del intercambio catiónico, sustituyéndolo por H^+ y disminuyendo el pH del suelo que va al agua por escurrimiento .
- 2) Los cursos de agua en cuencas forestadas tienen mayor cantidad de materia orgánica y concentración de nutrientes respecto de cursos en cuencas similares no forestadas. Esto se debe a que los suelos forestales son más erosionados y a que el mantenimiento de las plantaciones

forestales utiliza fertilizantes (entre otros agroquímicos) que por escurrimiento llegan a las aguas superficiales. Además, suelen quedar restos de podas sobre los suelos, por lo que durante las etapas de plantación y cosecha ingresan por escorrentía superficial materia orgánica y nutrientes.

1.7) Predicciones

A escala global se supone que la forestación afecta negativamente la calidad de agua.

- 1) A nivel del meta-análisis se espera que los estudios sobre los efectos de la forestación en la calidad de agua se den en la misma magnitud en todas las partes del mundo en donde ha habido expansión de las plantaciones comerciales forestales.

Tanto a escala global como a escala local se espera encontrar que:

- 1) El pH del agua en los arroyos en cuencas con plantación forestal será más ácido que el pH del agua en los arroyos en cuencas con praderas naturales o con usos extensivos.
- 2) La carga de nutrientes en el agua de arroyos cercana a una forestación será mayor que en arroyos de pradera natural o con usos extensivos en sus cuencas de drenaje (debido a la mayor erosión de los suelos y uso de fertilizantes en los primeros), fluctuando temporalmente y en relación a variables meteorológicas como la precipitación.

2) Materiales y Métodos

2.1) Objetivo1: Meta-análisis

2.1.1) Búsqueda de datos

Para realizar el meta-análisis se buscaron artículos a través de los motores de búsqueda “Google scholar” y el portal “Timbó (/timbo.org.uy)” con distintas palabras clave relacionadas al tema, solas y en combinación (e.g. “forestation”, “water quality”, “land use change” y “nutrient concentration”).

Posteriormente, para poder realizar una comparación válida, se estableció que para que los artículos encontrados pudieran ser utilizados en el meta-análisis deberían cumplir los requisitos de poseer cuencas pareadas con uso forestal-pasturas, y con características geológicas similares y deberían utilizar la misma unidad de medida en las variables respuesta, o ser transformables a unidades comparables.

2.2) Objetivo 2: Estudio de cuencas pareadas en Uruguay

Se utilizaron datos provenientes de un proyecto que involucró una beca de iniciación a la investigación de PEDECIBA Geociencias de quien suscribe, en conjunto con el proyecto Alianzas ANII – FJR (responsable: Ing. L. Silveira). El proyecto Alianzas tiene como objetivo evaluar los efectos de la actividad forestal sobre los recursos naturales aguas y suelos, y obtener indicadores hidrológicos y edáficos comparables, medidos como impacto relativo a la situación natural bajo pastura para uso ganadero (uso más extensivo del suelo del Uruguay), mediante la creación de una red de microcuencas experimentales.

2.2.1) Área de estudio

Las áreas de estudio se ubican en la zona del litoral noroeste del país, en los departamentos de Paysandú y Rio Negro. Allí se localizan cuatro arroyos de bajo orden pertenecientes a las cuenca del río Uruguay y río Negro y con características geológicas similares, dos de ellos en cuencas forestadas (*F*): el arroyo Capilla Vieja *F* (32°14'55.5"S, 57°38'48.6"O) y Nueva Esperanza *F*

(32°30'18.6"S, 57°9'8.4"O) y dos en cuencas con paisajes de pasturas (no forestados, *NF*): Capilla Vieja *NF* (32°16'42.7"S, 57°36'17.4"O) y Nueva esperanza *NF* (32°30'20.2" S, 57°9'13.2" O).

Microcuencas Capilla Vieja *F* y *NF*

Las microcuencas Capilla Vieja Forestado y No Forestado se encuentran en el departamento de Paysandú (Figura 1). El área de la microcuenca forestada es de 2,12 km² mientras que el de la microcuenca no forestada es de 1,20 km². La vegetación de la microcuenca Capilla Vieja *NF* es de parque de algarrobos (*Prosopis* spp.) con gramíneas de ciclo invernal, mientras que en la microcuenca forestada existe una plantación de *Eucalyptus* del tipo *globulus* spp *maidenni*, plantada en el otoño-primavera del año 1998, con una densidad de 895 árboles/há y un área forestada de 1248 m² (Proyecto ALIANZAS ANII – FJR, 2016).

Microcuenca Nueva Esperanza *F* y Nueva Esperanza *NF*

Las microcuencas del establecimiento Nueva Esperanza se encuentran en la localidad de Mellizos, en el departamento de Río Negro (Figura 2). El área de la microcuenca forestada es de 0,22 km² mientras que el de la microcuenca no forestada es de 0,116 km². La vegetación predominante de la microcuenca Nueva Esperanza *NF* es de pastizales, donde predomina la vegetación herbácea de gramíneas, graminoides y otras herbáceas. La microcuenca Nueva Esperanza *F* fue forestada en abril del 2011 con *Eucalyptus* del tipo *globulus* spp *maidenni*, con una densidad de 1.080 árboles/ha y un área forestada de 160 m².

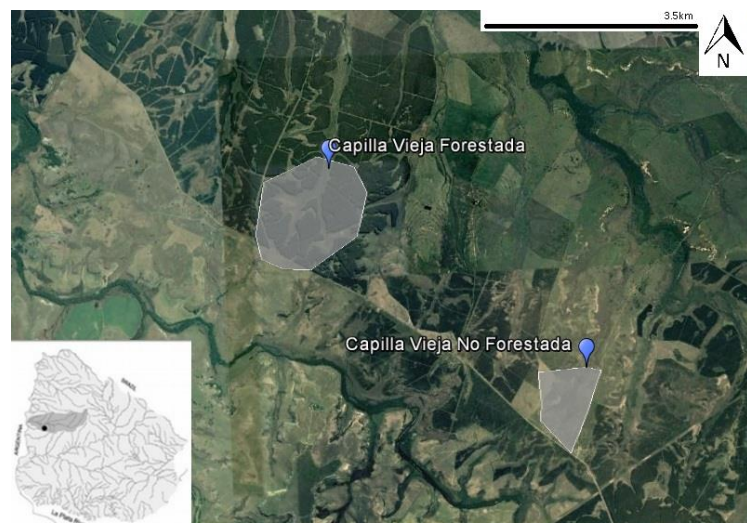


Figura 1: Localización de las microcuencas Capilla Vieja Forestada y Capilla Vieja No Forestada. En el mapa de Uruguay se muestra la ubicación de las microcuencas (punto negro).



Figura 2: Localización de las microcuencas Nueva Esperanza No Forestada y Nueva Esperanza Forestada. En el mapa de Uruguay se muestra la ubicación de las microcuencas (punto negro).

Las características geomorfológicas y edáficas de las microcuencas pareadas son muy semejantes (Proyecto ALIANZAS ANII – FJR 2016), lo cual aporta validez a la metodología de estudio seleccionada. Se decidió estudiar las variables de ambos pares de cuencas por separado, dado a que si bien presentan características geológicas similares, la superficie de ambos pares de cuencas es distinta (Área Nueva Esperanza F: 0,22 Km²; Área Nueva Esperanza NF: 0,116 Km²; Área Capilla Vieja F: 2,12 Km²; Área Capilla Vieja NF: 1,20 Km²).

2.2.2) Muestras de agua

Se realizaron once muestreos desde Abril del 2013 a Enero del 2015.

En cada arroyo, se tomaron tres muestras de agua subsuperficial, en puntos cada 30 metros, que se guardaron congeladas y en la oscuridad hasta su análisis en laboratorio.

Se tomaron sub-muestras para analizar la concentración de nutrientes totales (nitrógeno y fósforo, según Valderrama, 1981), de sólidos totales en suspensión y de materia orgánica en suspensión en el agua, por el método de ignición (APHA, 1995). Las muestras fueron filtradas con filtros GF/C, y se determinó la

concentración de nutrientes disueltos (NO_3 y NO_2 , Müller & Widemann, 1955; NH_4 , Koroleff, 1970), y PO_4 (Murphy & Riley, 1962). Por otro lado, de dichas muestras también se midieron variables físico-químicas, tales como conductividad (Horiba D-24), pH (Oakton pH tester 20) y alcalinidad (APHA, 1995). Estas variables fueron analizadas en los laboratorios del CURE, Maldonado. En laboratorios externos al CURE (laboratorios de INIA y OSE), se analizó la concentración de cloruros (APHA, 1995) y sulfatos (APHA, 1995) y de cationes principales (Ca, Mg, Na, K, Mn y Cu) (APHA, 1995) en el agua.

No se estudiaron los mismos parámetros en todas las fechas de muestreos.

2.3) Análisis de datos:

2.3.1) Objetivo 1: Meta-análisis

Se comparó la concentración de nutrientes en agua y variables físico-químicas entre arroyos de las cuencas forestales y no forestales, agrupando todos los datos a nivel global y analizándolos mediante test estadísticos no paramétricos, ya que los supuestos para la aplicación de test paramétricos (normalidad y homogeneidad de varianzas) no se cumplieron. El test aplicado fue el de Mann-Whitney ($\alpha=0.05$) y el software utilizado fue el programa libre Past (Hammer, et al., 2006)

2.3.2) Objetivo 2: Estudio de microcuencas pareadas en Uruguay

Primeramente se realizó un análisis de componentes principales (ACP), con el objetivo de identificar la variabilidad en las características físico-químicas del agua de cada arroyo a lo largo de diferentes muestreos y detectar la existencia de patrones asociados a cada uso de suelo y cuáles son los factores más relevantes. Este análisis se realizó utilizando únicamente las variables registradas en todos

los muestreos (NT, PT, PRS, NO₃, pH, Conductividad y Alcalinidad) mediante el paquete *vegan* en el software libre R (R Core Team, 2016).

Posteriormente, luego de comprobar el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se comparó la media de la concentración de nutrientes (NH₄, NO₃, PO₄, PRS, NTD, PTD, PT, NT), variables físico-químicas (pH, Conductividad, Alcalinidad, STS y MOS) y concentración de Sulfatos, Cloruros y cationes (Ca, Mg, K, Na, Cu y Mn), a partir de los promedios de tres muestras de agua tomadas a lo largo de una sección de 30 m en cada muestreo, entre arroyos de las cuencas forestales y no forestales mediante test estadísticos paramétricos (ANOVA de una vía; factor: uso del suelo, con dos niveles: forestado vs. pasturas), utilizando cada fecha de muestreo como réplica (n=11). En el caso de las variables que no cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza: materia orgánica en suspensión (MOS) y conductividad en ambas cuencas; concentración de NO₂ y alcalinidad en la cuenca de Capilla Vieja y concentración de sólidos en suspensión en las cuencas de Nueva Esperanza, la comparación estadística entre cuencas forestales y de pastura se realizó mediante test no paramétrico de Mann-Whitney ($\alpha=0.05$).

Dado que la concentración de nutrientes en arroyos en un momento determinado, además del uso del suelo, depende de características del clima y la meteorología, como la precipitación (Tsegaye et al., 2006), se analizó la relación entre las precipitaciones y la concentración de fósforo total en el agua mediante regresiones lineales para cada cuenca analizada.

Se utilizó de forma arbitraria la precipitación acumulada 72 horas antes del muestreo, ya que esto puede reflejar mejor la exportación de nutrientes al arroyo que la lluvia registrada en el mismo momento del muestreo. Los datos de precipitaciones fueron registrados por la Facultad de Ingeniería en el marco del proyecto Alianzas, en las cuencas de estudio (Capilla Vieja y Nueva Esperanza), la misma se midió de forma continua con un pluviógrafo digital.

Todos los análisis se realizaron en el software libre "R" (R core team 2016).

3) Resultados

3.1) Objetivo 1: Meta-análisis

Efectos de la forestación sobre la calidad de agua a escala global

La búsqueda sistemática de datos, concluyó con un total de 34 artículos científicos con información de calidad de agua comparando forestación con otros usos de suelo. De ese total de artículos, la gran mayoría (22 artículos) no fueron incluidos porque no cumplieron con los requisitos de este estudio. De esos 22 artículos, la mayoría pertenecían a los países de Nueva Zelanda (seis artículos) y Estados Unidos (siete artículos). En general, estos artículos referían a efectos de la forestación sobre la cantidad de agua (es decir, sobre el caudal, evapotranspiración o escorrentía), o poseían unidades de medida no transformables (por ejemplo Método Kjeldahl para estimar las concentraciones de nitrógeno), o comparaban la calidad de agua de distintos usos de suelo sin incluir el uso de suelo pastizal.

De la totalidad de artículos encontrados, solamente 12 cumplieron con los requisitos de este estudio, de los cuales cuatro son originarios de Nueva Zelanda, otros cuatro son de origen sudamericano (particularmente de Argentina y Uruguay) y los restantes son del Reino Unido (UK) y de Estados Unidos (USA) (Tabla 1). Los artículos encontrados fueron escritos desde el año 1987 hasta el año 2015, siendo más abundantes a partir del año 2000.

Tabla 1: Resultados de la búsqueda para meta-análisis, clasificando cada estudio por país, número de cuencas estudiadas, tipo de plantación presente (P=pinos, E=eucaliptus), presencia de datos de Nutrientes / Físico-Química/ Cationes, las diferencias encontradas entre usos forestal/pasturas y la revista de publicación. Las columnas vacías indican que esas variables no fueron medidas en dicho estudio. Se resalta las diferencias significativas entre arroyos de cuencas de pasturas y forestación exótica.

País	N° de cuencas estudiadas (forestal vs. pastura)	Nutrientes	Físico-Química	Cationes	Referencia	Diferencias forestación/ pastura	Revista
UK	2 forestal; 2 pastura		pH	Al	Hornung et al. 1987	pH: Forestal< Pastura; Al Forestal>pastura	Forest Hydrology and Watershed Management
New Zealand	1 forestal (P); 1 pastura	NO ₃ /NH ₄ /PT/PRS			Cooper & Thomsen. 1988	P & N: Forestal<Pastura	New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research
Gales	2 forestal ; 2 pastura	NH ₄ / NO ₃ /SO ₄ /HCO ₃	pH	Ca/K/Mg/Na /Al/Cl/Si	Reynolds et al. 1989	Na, Ca, Mg, Al, NH₄, NO₃, SO₄, Cl, HCO₃ & Si: Forestal > Pastura pH: Forestal < Pastura	Hydrological Sciences Journal
New Zealand	4 forestal (P); 4 pastura	NO ₃ /SO ₄	Cond/pH/Alc	Ca/Cl/Fe/K/ Mg/Na	Harding & Winterbourn . 1995	No hay diferencias.	New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research
New Zealand	1 forestal (P); 3 pastura	NT/NO ₃ /NH ₄ /PT/ PRS	TSS/NTU/Cond/ pH/Alc		Quinn & Stroud. 2002	TSS & NTU: Forestal>Pastura PRS, pH & Alc: Forestal<Pastura	New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research
Gales	2 forestal (P); 2 pastura		pH	Al	Petersen et al. 2004	No hay diferencias.	Journal of Applied Ecology
New Zealand	2 forestal(P); 2 pastura	PRS	TSS		Young et al. 2005	PRS: Forestal < Pastura	New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research
Uruguay /Argentina	4 forestal (P y E) ; 4 pastura		pH	Ca/K/Mg/Mn /Na	Farley et al. 2008	pH, Ca, K, Mg & Mn: Forestal < Pastura	Water Resources

Argentina	3 forestal (P); 3 pastura	NT/NO ₃ / NH ₄ /PT/ PRS	TSS/DO/Cond	Miserendino & Masi. 2010	No hay diferencias.	Research Ecological Indicators
Argentina	3 forestal (P); 3 pastura	NO ₃ /NH ₄ / PRS	TSS/NTU/DO/ Cond/pH	Miserendino et al. 2011	No hay diferencias.	Science of the Total Environment
USA (Virginia)	3 forestal (P); 2 pastura	NO ₃	DO/Cond/pH	Lu et al. 2013	No hay diferencias.	Journal of Geophysical Research: Biogeosciences
Argentina	3 forestal (P); 3 pastura		Cond/pH	Márquez et al. 2015	No hay diferencias.	Limnologica

Los datos extraídos fueron tanto de concentraciones de nutrientes y variables físico-químicas, como de concentraciones de cationes (Tabla 1), siendo los datos más frecuentes y por lo tanto los de mayor interés a nivel general, los de pH, seguido por la conductividad y la concentración de ciertos cationes como calcio, magnesio y sodio (Tabla 2). Como se planteó en la introducción, se esperaba encontrar datos con cambios en variación de la materia orgánica, pero en los artículos buscados en el meta-análisis no se presentaron estos datos.

Del total de artículos utilizados para el meta-análisis, cinco de ellos centraban sus estudios exclusivamente en temas de calidad de agua, mientras que el resto se centraban en insectos acuáticos, zoobentos, biodiversidad y microbiota. Es relevante destacar que de la totalidad de los 12 artículos utilizados, únicamente seis concluyeron en su propio texto encontrar diferencias significativas en la calidad del agua entre forestación y pastura, destacando que se encontró un descenso de pH en los arroyos con forestaciones en cuatro artículos (de nueve que analizaron pH), un aumento de la concentración de aluminio (Al) en agua en los arroyos forestados de dos artículos (de un total de tres que lo analizaron) y un descenso de la concentración de fósforo reactivo soluble (PRS) en los arroyos forestados de dos artículos (de cinco que lo analizaron). Otras variables, como el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), presentaron resultados contradictorios en dos artículos (Tabla 1).

Es de importancia destacar que se encontró gran variabilidad entre los rangos de nutrientes entre todos los arroyos estudiados. Por ejemplo, en la Patagonia Argentina los valores medios reportados por Miserendino & Masi (2010) en arroyos con cuencas forestadas, fueron concentraciones medias (\pm desvío estándar) de $0.2 \pm 0.26 \mu\text{g NO}_3\text{L}^{-1}$, mientras que en arroyos de pasturas fueron de $0.03 \pm 0.057 \mu\text{g NO}_3\text{L}^{-1}$. En cambio, en el estado de Virginia, Estados Unidos, la concentración media (\pm desvío estándar) reportada por Lu et al. (2013) fue de $1310 \pm 1120 \mu\text{g NO}_3 \text{L}^{-1}$ en arroyos con forestación, mientras que en arroyos con pasturas fue de $1050 \pm 1100 \mu\text{g NO}_3 \text{L}^{-1}$.

Al agrupar y analizar estadísticamente todos los estudios, no se encontraron diferencias significativas entre cuencas forestadas y de pasturas para los valores de la mayoría de las variables encontradas (i.e. concentración en agua de Nitrógeno total, NO_3 , NH_4 , Fósforo total, Sólidos totales solubles, Fósforo reactivo soluble, y Oxígeno disuelto, Conductividad, pH, Calcio, Potasio y Magnesio) (Mann Whitney $p > 0.05$, Tabla 2). En varios artículos se presentó un valor medio para varios arroyos.

Tabla 2: Resultados estadísticos del meta-análisis a partir de la información dada en los artículos en la Tabla 1. Se indica el número de sistemas que reportaron valores (N° de arroyos), el número de datos efectivamente disponibles para el meta-análisis, la media de la concentración para cada variable con su rango entre ambos usos de suelo y el resumen estadístico según las pruebas de Mann-Whitney entre ambos usos de suelo. En negrita se muestran los datos (de sodio y aluminio) que obtuvieron una significancia estadística significativa entre pastura y forestación.

	N° de arroyos	N° de datos	Forestación		Pastura		Resumen estadístico	
			Media	Rango	Media	Rango	W	P
NT	5	4	200.5	[10-428]	613	[410-816]	-0.153	0.877
NO3	15	9	68.2	[0-237]	57.4	[0-446]	0.044	0.964
NH4	8	6	2.9	[0-12]	3.4	[0.4-13]	-0.527	0.598
PT	5	5	16.6	[7-40]	26.8	[8-56]	-0.723	0.469
PRS	9	7	4	[0.2-10]	9.5	[0.4-23]	-1.088	0.469
TSS	8	6	5.8	[0.5-20.9]	6.1	[1.1-14.8]	-0.08	0.936
DO	9	8	7.6	[3-10.3]	7.5	[4-10.2]	-0.105	0.916
Conductividad	14	11	93.1	[38-158.9]	69.3	[8.7-146.4]	-0.656	0.51
pH	20	16	5.6	[4.4-8.2]	6	[4.8-7.4]	-1.51	0.129
Ca	10	10	0.9	[0.8-1.2]	0.9	[0.7-1.4]	-1.247	0.21
K	10	8	0.5	[0-1.2]	1.3	[1.2-1.6]	-1.71	0.086
Mg	10	10	0.3	[0.1-0.8]	0.6	[0.5-0.9]	-1.51	0.13
Na	10	10	4.3	[4.6-4.3]	8.8	[3.2-25.3]	-1.931	0.053
Al	6	6	1.3	[0.3-5.6]	0.1	[0.1-0.08]	-2.49	0.012

Sin embargo, a nivel global se encontró diferencias entre la concentración de Sodio en el agua (poco significativa: $p=0,053$), que tendió a ser menor en los arroyos con forestación cercana (promedio forestación= 4.36 ± 0.24 mg Na/l (media \pm desvío estándar), promedio pasturas= $10.65 \pm 12,68$ mg Na/l; $n=10$) y de Aluminio (significativa: $p=0,012$), que tendió a concentraciones mayores en arroyos con forestación cercana (promedio forestación= 1.60 ± 2.71 mg Al/l, promedio pasturas= 0.05 ± 0.01 mg Al/l; $n=6$).

3.2) Objetivo 2: Estudio en microcuencas pareadas en Uruguay

Comparación de calidad de agua entre cuencas pareadas

En el análisis de componentes principales (ACP), el componente 1 explicó el 39% de la variabilidad de las características del agua de los arroyos durante el año muestreado. Las variables asociadas a este componente fueron NT, NO_3 , PT y pH. El segundo componente explicó un 28% y las variables asociadas fueron NO_3 , PRS, PT, Conductividad y Alcalinidad. En total se explicó el 67% de la variabilidad de los muestreos.

Hubo una gran variabilidad entre los parámetros estudiados a lo largo del año, existiendo variaciones consistentes en cada muestreo en todos los arroyos (e.g. en la fecha del mes 10-2014, donde todas las cuencas presentaron mayores valores de nutrientes y pH) (Figura 3). El análisis ACP mostró una diferencia de rangos de valores entre los arroyos de Nueva Esperanza y los arroyos de Capilla Vieja. A su vez, se observaron algunas variaciones entre los distintos usos de suelo, siendo más visibles en los arroyos de la cuenca de Nueva Esperanza. En ella el arroyo con forestación presentó mayor variabilidad temporal (puntos con mayor dispersión en el ACP) que el arroyo con pastura, en todos los factores estudiados.

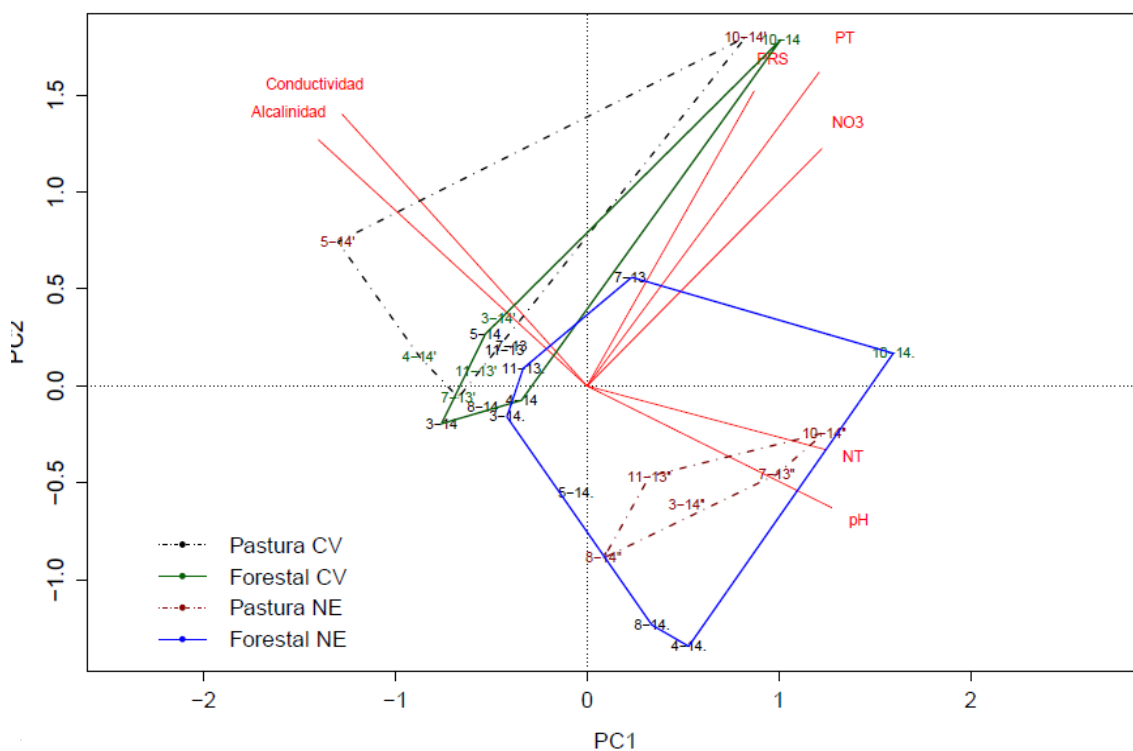


Figura 3: Análisis multivariado ACP (análisis de componentes principales) el cual mediante la variabilidad de todos los factores fisicoquímicos de cada arroyo, detectó los patrones más relevantes. Cada arroyo está diferenciado con un color distinto: Capilla Vieja (CV) pastura negro punteado, Capilla Vieja forestal verde y línea continua, Nueva Esperanza (NE) pastura rojo punteado y Nueva Esperanza forestal azul en línea continua. Se muestran las variables principales en color rojo y cada fecha de muestreo (mes y año). Se destaca una tendencia hacia la diferencia del rango de valores entre los arroyos Capilla Vieja y los de Nueva Esperanza y una desviación de todos los arroyos en la fecha 10-14 (octubre del año 2014), generadas por altos valores de las variables PT (fósforo total), PRS (fósforo reactivo soluble), NT (Nitrógeno total), NO₃ (Nitrato), y pH.

Para varias de las variables no hubo diferencias significativas entre los arroyos con forestación y los arroyos con pastura (test ANOVA y test Mann-Whitney, $p > 0.05$, Tabla 3). Particularmente, la concentración de nutrientes no difirió significativamente entre cuencas forestadas y de pastura cuando cada muestreo se utilizó como una réplica (Figura 4). Sin embargo, la alcalinidad y conductividad presentaron diferencias significativas entre ambos usos de suelo para todas las cuencas (Figura 5 A, B, C y D). En los arroyos de Capilla Vieja se encontraron diferencias significativas entre usos forestal y pastura para las concentraciones de cloruros, fósforo reactivo soluble, amonio, sodio y magnesio; en los arroyos de

Nueva Esperanza las diferencias significativas entre ambos usos de suelo se encontraron en la variable Nitrógeno total disuelto (Tabla 3).

Tabla 3: Diferencias en las características medias (y su rango) del agua entre los arroyos Forestados (F) versus Pasturas (P). En las columnas superiores se muestran los resultados de la microcuenca Capilla vieja y en las inferiores los resultados de la microcuenca Nueva Esperanza. Las diferencias significativas ($p < 0,05$) se resaltan en negrita y los valores marginalmente significativos se muestran en cursiva, señalando la dirección de la diferencia. El símbolo * demuestra los valores menos significativos; ** valores comprendidos entre $< 0,05$ y $> 0,001$ y *** son los más significativos con valores $< 0,001$. Cuando las variables cumplieron con los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad se aplicó un test de ANOVA (F) de una vía y en caso del no cumplimiento de los supuestos se utilizó el test no paramétrico de Mann-Whitney (W).

Capilla Vieja	Forestal		Pastura		Estadístico	p	Dif
	Media	Rango	Media	Rango			
NH4	17.6	[1.3-69.6]	12.6	[1.9-29.2]	F= 5.020	0.029*	F>P
NO3	141.96	[50.9-379.1]	116.2	[12.1-270.4]	F= 3.260	0.076	F>P
NO2	13.2	[0-63.1]	2.5	[0-7.3]	W=397	0.75	
PRS	4	[1.1-14.6]	7.6	[1.4-33.3]	F= 12.390	0.001**	P>F
NTD	348.3	[227-479.6]	345.2	[230.1-577.5]	F= 0.002	0.96	
PTD	51.5	[14.1-221.5]	59.8	[15.2-242.4]	F= 1.150	0.28	
PT	81.7	[34.1-300.1]	72.6	[25.8-246.6]	F= 0.125	0.725	
NT	459.5	[331.2-621.1]	440.4	[255.4-646.9]	F= 0.312	0.579	
Alcalinidad	139.8	[84-206.7]	124.8	[106-149.3]	W=373	0**	F>P
Conductividad	185.8	[94-296.3]	173.9	[152-194]	W=393	0**	F>P
pH	7.3	[6.77-8.4]	7	[6.37-7.4]	F= 0.076	0.8	
STS	84.3	[17.8-144.6]	54.5	[3-137.5]	F= 3.860	0.1	F>P
MOS	11.4	[3.8-25]	7.8	[4.3-11.4]	W=264	0.4	
Sulfatos	8.1	[0.7-15.8]	9.8	[0.7-16.7]	F= 0.002	0.1	
Cloruros	1.5	[1.1-2.7]	2.9	[2.2-4.3]	F= 8.317	0**	P>F
Ca	47.8	[29.8-58.9]	49.7	[45.2-59.1]	F= 0.349	0.6	
Mg	4.9	[3.9-5.8]	4.2	[3.9-4.8]	F= 9.784	0**	F>P
K	9.9	[3.5-22.8]	11	[4.7-25]	F= 0.036	0.9	
Na	1.7	[1.3-1.9]	0.7	[0.5-1.1]	F= 50.410	<0.001**	F>P
Cu	60.8	[0-104]	63.8	[0-101]	F= 0.019	0.9	
Nueva Esperanza	Forestal		Pastura		Estadístico	p	Dif
	Media	Rango	Media	Rango			
NH4	23.9	[6-39]	21.4	[0.4-100]	F= 1.989	0.164	
NO3	146.9	[25.8-430.3]	123.8	[5.2-261]	F= 0.090	0.766	
NO2	2.7	[0-8]	5.3	[4.5-6]	F= 0.650	0.424	
PRS	5.8	[1.1-25.1]	5.3	[3-12]	F= 0.510	0.478	
NTD	403.5	[302.8-521.7]	517.5	[391.1-726]	F= 5.748	0.018*	P>F
PTD	38.1	[12-108]	38.4	[16.7-110]	F= 2.670	0.108	
PT	53	[19.9-158.9]	64.1	[26.7-128.2]	F= 0.550	0.462	
NT	535.7	[340.6-982.7]	757.7	[473.2-1537]	F= 3.815	0.056	P>F

Alcalinidad	85.4	[43.3-124]	87	[30-142.6]	F= 29.130	<0.001**	F>P
Conductividad	129.7	[53.7-193]	122.1	[57-170.3]	W=407	<0.001**	F>P
pH	7.3	[6.49-7.7]	7.2	[6.7-7.6]	F= 0.042	0.838	
STS	46.2	[22.2-95.8]	23	[5-34.2]	W=212	0.96	
MOS	11.4	[9.1-12.5]	7.4	[4.2-9.5]	W=161	0.2	
Sulfatos	9.9	[1-16.5]	9.3	[0.8-15.6]	F= 0.012	0.914	
Cloruros	2.1	[0.8-4.6]	3.5	[1.7-6.2]	F= 1.575	0.245	
Ca	33.3	[24.1-42]	28.4	[10.7-46]	F= 0.731	0.412	
Mg	5.2	[3.9-7]	4.3	[1.9-7.7]	F= 0.983	0.345	
K	10.8	[3.7-24.1]	10.1	[2.2-24.1]	F= 0.015	0.905	
Na	2.1	[1.1-3.1]	1.5	[0.6-3.3]	F= 1.043	0.331	
Cu	63	[0-107]	62.2	[0-105]	F= 0.001	0.997	

En las cuencas pareadas de Capilla Vieja las concentraciones de Mg y Na fueron siempre superiores en el arroyo con forestación (Figura 6 B y C), sin embargo los cloruros mostraron un patrón contrario (Figura 6 A): hubo mayor concentración en las aguas del arroyo con pastizal que en las aguas de forestación.

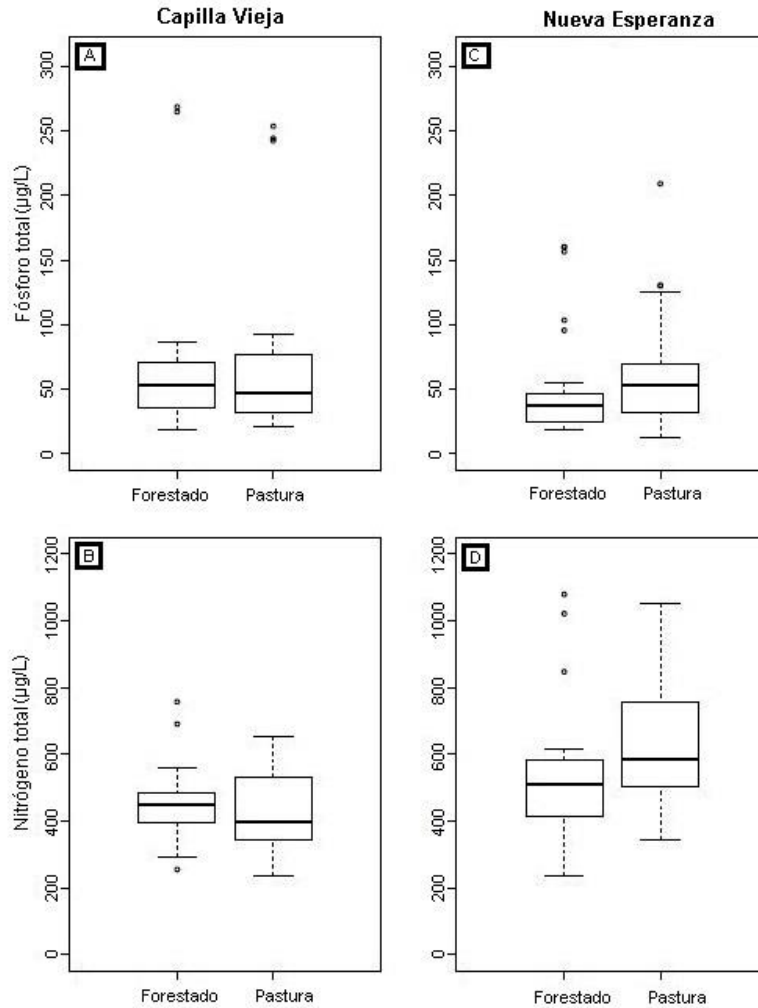


Figura 4: Concentración en agua de los principales nutrientes (los análisis estadísticos de estas variables se encuentran en la Tabla 3). Las gráficas A y C: muestran la media (línea horizontal) del fósforo total de todas las fechas de muestreo para los pares de microcuencas Capilla vieja y Nueva Esperanza, respectivamente. En las gráficas B y D: se muestra el promedio del nitrógeno total en todas las fechas de muestreo para las microcuencas Capilla vieja y Nueva Esperanza, respectivamente. Los gráficos muestran la distribución de los datos en las que se aprecia el 50% de los datos en la caja; las líneas inferiores y superiores representan el 25% del resto de los datos de cada lado, excluyendo los valores atípicos representados con puntos.

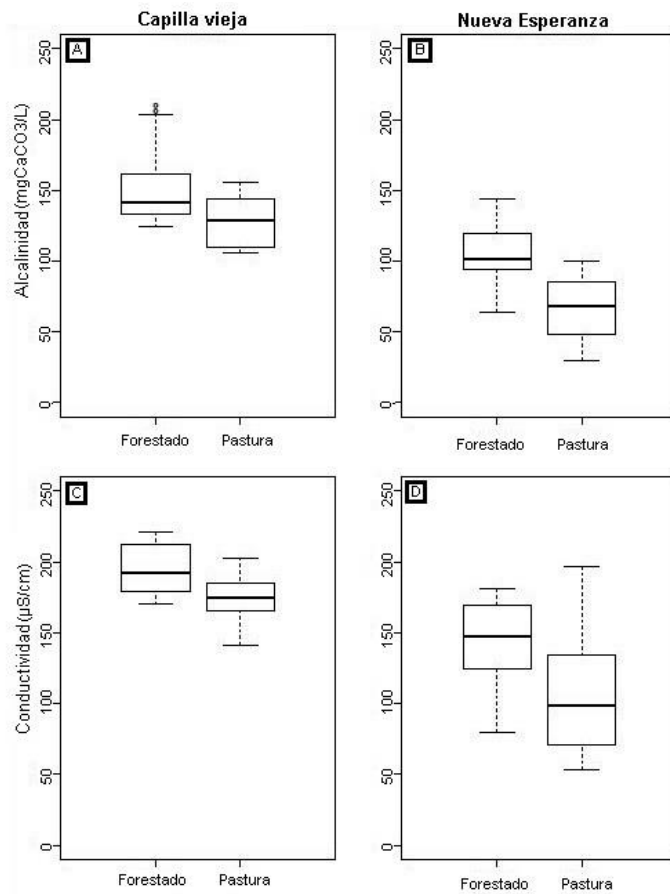


Figura 5: Alcalinidad y conductividad del agua en arroyos de cuencas pareadas (los análisis estadísticos de estas variables se encuentran en la Tabla 3). Las gráficas A y B: promedio de la Alcalinidad en todas las fechas de muestreo para las microcuencas Capilla vieja y Nueva Esperanza respectivamente. Gráficas C y D: Conductividad media (línea horizontal) de todas las fechas de muestreo para las microcuencas Capilla vieja y Nueva Esperanza respectivamente. Los gráficos muestran la distribución de los datos en las que se aprecia el 50% de los datos en la caja; las líneas inferiores y superiores representan el 25% del resto de los datos de cada lado, excluyendo los valores atípicos representados con puntos.

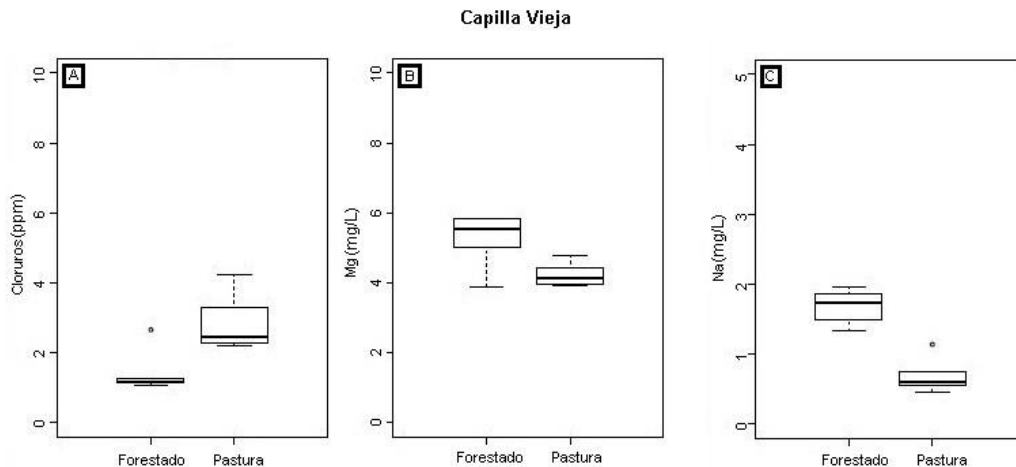


Figura 6. Concentración de iones en las cuencas pareadas de Capilla Vieja (los análisis estadísticos de estas variables se encuentran en la Tabla 3). Las gráficas A, B y C presentan respectivamente el promedio de Cloruros, Magnesio (Mg) y Sodio (Na) en todas las fechas de muestreo para la microcuenca de Capilla vieja. En cada gráfico se representa el arroyo rodeado de forestación a la izquierda y el arroyo rodeado de pastura a la derecha. Los gráficos demuestran la distribución de los datos en las que se aprecia el 50% de los datos en la caja; las líneas inferiores y superiores representan el 25% del resto de los datos de cada lado, excluyendo los valores atípicos representados con puntos.

Dinámica temporal de las concentraciones de nutrientes

El fósforo total presentó un aumento en su concentración el día del muestreo del mes de octubre de 2014, con respecto a los otros meses (Figura 7B), mientras que en otras variables no se encontró este patrón tan claro (por ejemplo con nitrógeno total, Figura 7A). En el muestreo de octubre, los dos arroyos con forestación cercana presentaron concentraciones más altas de fósforo total en sus aguas que los dos arroyos rodeados de pastizales (Figura 7B).

Al analizar los resultados anteriores en función de las precipitaciones acumuladas 72 horas antes de los muestreos, se encontró una asociación entre las precipitaciones y los niveles de concentración de fósforo obtenidos (regresión lineal: $p < 0.001$, $r^2 = 0.45$, $n = 36$) (Figura 7C, Figura 8). Las precipitaciones acumuladas en las 72 horas antes del muestreo del día 19 de octubre del 2014 fueron más intensas que en los otros muestreos (para Capilla Vieja la precipitación del muestreo del 19 de octubre $P_{CV10} = 23,6\text{mm}$ y para Nueva Esperanza $P_{NE10} = 2,1\text{mm}$).

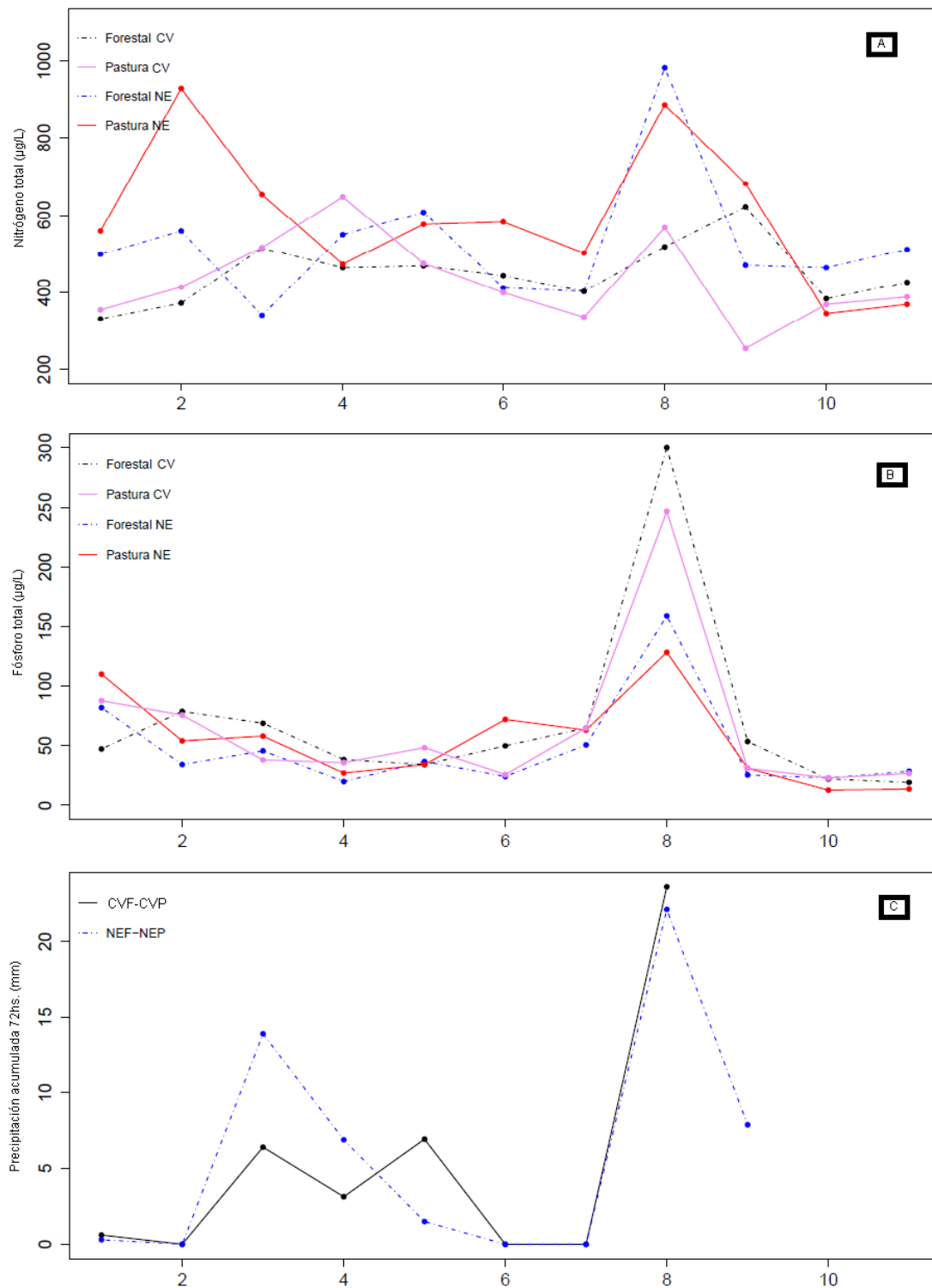


Figura 7: Variación temporal de las concentraciones de nutrientes en agua (Nitrógeno total y Fósforo total) y precipitaciones acumuladas 72 horas antes del muestreo en las microcuencas experimentales. Gráficos A y B: Nitrógeno total y Fósforo total respectivamente en cada fecha de muestreo. Líneas continuas para la microcuenca Nueva Esperanza (línea continua negra forestal y línea continua roja pastura). Líneas punteadas para la microcuenca Capilla Vieja (línea punteada negra forestal y línea punteada rosa pastura). Gráfico C: precipitación acumulada de 72 horas antes del muestreo versus la fecha de cada muestreo.

Al analizar la relación entre la precipitación acumulada y la concentración de fósforo total en el agua en los distintos arroyos, se encontró que en los eventos de muestreo en los que no llovió o hubo una lluvia leve (no más de 15mm/72horas), las concentraciones de fósforo total en el agua entre los distintos sitios estudiados parecen ser similarmente bajas (promedio $=48.3\pm 19.0$). Sin embargo, cuando aumentó el volumen de lluvias (en este período solo existe una fecha de muestreo donde la lluvia fue mayor a 20mm/72horas), sí hubo diferencia en la concentración de fósforo entre los distintos usos del suelo. Si bien para ambos usos de suelo (agrupando ambas cuencas) aumentó el fósforo en agua con el aumento en la precipitación ($p < 0,001$, $r^2 = 0,50$, $n = 18$; $p = 0.006$, $r^2 = 0,30$, $n = 18$ – para ambas cuencas forestales y de pasturas agrupadas, respectivamente-), en los arroyos con forestación tendió a aumentar aún más que en arroyos con pasturas, (Figura 8). De todas formas, las diferencias en las concentraciones medias de fósforo total para ambos usos de suelo (agrupando ambas cuencas) no fueron estadísticamente significativas ($p > 0.05$) (Tabla 3).

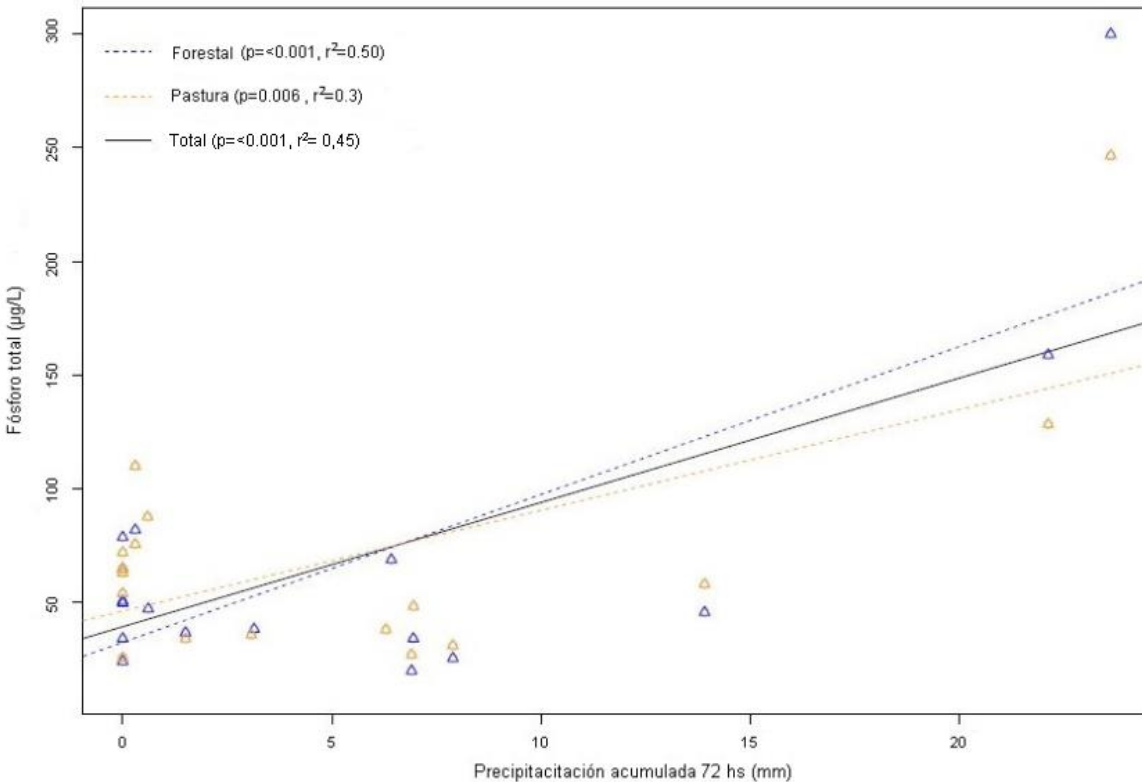


Figura 8: Regresión lineal entre la concentración en agua del fósforo total y la precipitación acumulada 72 horas antes de los muestreos para las cuencas forestales y de pastura agrupadas. Los datos de los arroyos forestados Nueva Esperanza y Capilla Vieja se encuentran representados por triángulos color azul y los datos de los arroyos con pasturas Nueva Esperanza y Capilla Vieja se encuentran representadas por triángulos color naranja. Las rectas punteadas representan las regresiones lineales de cada tipo de uso de suelo con los respectivos colores. A su vez se ve una recta negra y continua que representa la regresión lineal entre todos los datos agrupados integrando los distintos tipos de usos de suelo. Para todas las regresiones se observa un aumento del fósforo total al aumentar la precipitación (los valores de p y r^2 se muestran en el gráfico).

En las cuencas de Capilla Vieja, se destacó un fuerte aumento de concentración de fósforo total en función de las precipitaciones en el uso de suelo “forestal” ($p=0.002$, $r^2= 0.77$, $n=9$) mientras que en uso de suelo “pastura”, la regresión lineal tuvo una pendiente menor ($p=0.007$, $r^2=0.68$, $n=9$), (Figura 9A). Sin embargo, en las cuencas de Nueva Esperanza la diferencia entre los usos de suelo fue más marcada: mientras que en el uso de suelo forestal se notó un comportamiento similar al descrito anteriormente ($p=0.05$, $r^2=0.35$, $n=9$), para el uso de suelo “pastura” esta relación no fue significativa ($p>0.3$, $n=9$), por lo cual se

ve que la concentración de fósforo en agua no presentó cambios con el aumento de las precipitaciones (Figura 9B).

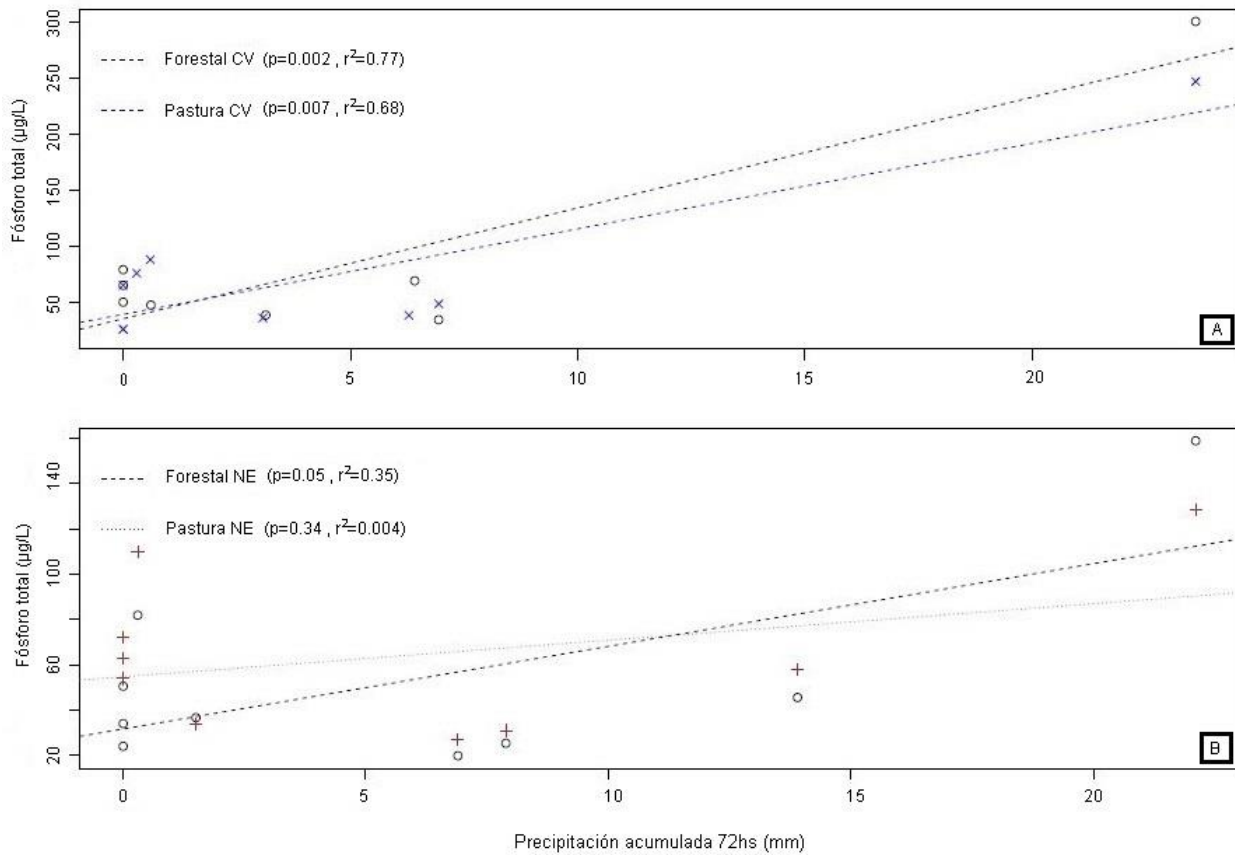


Figura 9: Relación entre la precipitación acumulada 72 horas antes de los muestreos y el fósforo total para los distintos usos de suelo en las cuencas pareadas de Capilla Vieja (CV, panel A) y de Nueva Esperanza (NE, panel B). El uso de suelo forestal se encuentra representado por círculos y el uso de suelo pastura se encuentra representado por cruces. Los valores de los test estadísticos se muestran en el gráfico. Los datos de los arroyos forestales se encuentran representados por líneas punteadas color negras y los de pastura por líneas punteadas rosadas.

4) Discusión

Efectos de la forestación sobre la calidad de agua a escala global

Los resultados obtenidos a partir de la búsqueda de datos no mostraron en su mayoría patrones claros: solo se encontraron diferencias entre cuencas forestales y de pastura en las concentraciones de los cationes de Na y Al en agua. Tampoco se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de los principales nutrientes de los arroyos con ambos usos de suelo; en contra de la hipótesis planteada. Otra de las hipótesis de este estudio esperaba encontrar datos de materia orgánica, lo cual es interesante que al haber encontrado en su mayoría resultados de estudios biológicos, no haber encontrado ninguno que reportara datos de materia orgánica. La variabilidad entre las concentraciones de nutrientes, cationes (a excepción de Na y Al) y características físico-químicas del agua de los arroyos entre las distintas regiones (reflejada en la ausencia de patrones claros), podrían asociarse a los distintos tipos de suelo (pertenecientes a las distintas regiones de los artículos estudiados) y diferencias en el clima, entre otros factores como por ejemplo el estado de maduración de las plantaciones o proporciones de áreas plantadas.

Otro factor que podría estar afectando este estudio comparativo es la intensidad del uso de la pastura (es decir, si la pastura tiene algún uso como la ganadería extensiva y cuál es la concentración de ganado por hectárea en ese caso). En un estudio (Jones & Holmes, 1985), se llegó a la conclusión de que las pasturas que tienen un uso con intensidad baja, o sea que son levemente pastoreadas, pierden menos sedimentos que un bosque, en cambio si las pasturas son sobre-pastoreadas tienen altas tasas de pérdida de sedimentos y nutrientes.

En otro estudio, en el que se analizaron los efectos de distintos usos de suelo sobre los nutrientes de los arroyos (Young et al., 1996), se comparó información proveniente de distintos cuerpos de agua de Australia y América del Norte, encontrando que los valores de nutrientes publicados para América del Norte fueron mayores que los reportados para Australia. Debido a estos resultados desiguales, los autores del artículo concluyen que condiciones ambientales locales

como el clima (e.g. intensidad de lluvias), topografía (e.g. pendiente, tamaño de la cuenca) y el tipo de suelo, determinan la carga de nutrientes de los ecosistemas acuáticos, por lo que enfatizan la importancia de obtener información local sobre los efectos del uso de suelo en el agua.

Los resultados del presente meta-análisis sugieren que para realizar investigaciones de calidad de agua comparando usos de suelo (Pastura vs Forestal) de distintas localidades mundiales, es necesario obtener información precisa de las condiciones ambientales locales, de la topografía y tipo de suelo de cada estudio con el fin de disminuir el “ruido” al realizar las comparaciones estadísticas en el meta-análisis, incluyendo esos datos como co-variables, por ejemplo. Por otro lado, otro sesgo del presente estudio que puede estar generando desigualdad en los resultados es la gran variabilidad en cuanto a la duración de los muestreos en cada artículo estudiado. Debido a esto propongo que para realizar un meta-análisis comparando cuencas pareadas con distinto uso de suelo en todo el mundo, no solamente es necesario que se cumplan los requisitos anteriormente descritos, sino que también sería necesario que los artículos estudiados presenten una frecuencia y duración de muestreos similar, o que los artículos presenten disponibles sus datos “crudos” y de esta forma se pueda elegir el mismo período y frecuencia para todos los datos por igual.

Sin embargo, a pesar de las grandes diferencias y variabilidad entre regiones, hubo dos cationes para los que sí se encontró un patrón global significativo entre arroyos con pastura y arroyos con forestación: las concentraciones de Na^+ disminuyen mientras que las de Al^{3+} aumentan en los arroyos de cuencas forestadas (Tabla 2). La mayoría de la bibliografía referida a cambios en las concentraciones de aluminio en agua argumenta que en ciertos tipos de cuencas forestadas la absorción de Ca^{++} por parte de los árboles cambia el pool de cationes en los suelos, aumentando la cantidad de hidrogeniones, lo que provoca una disminución del pH, desestabilizando las arcillas y la materia orgánica por la cantidad de H^+ , liberando de esta manera cationes como Al^{3+} (Hornung et al., 1987; Petersen et al., 2004, Berthrong et al., 2009). De todas formas, no es raro encontrar aluminio en las aguas continentales ya que se sabe

que este metaloide es uno de los más abundantes y es el tercer elemento más común en las aguas después del oxígeno y del silicio (Holguín et al., 2006). Lo que llama la atención es encontrarlo en las forestaciones en mayor concentración que en pastizales, lo que puede estar indicando un efecto de las forestaciones sobre los suelos y las aguas. Con respecto a los resultados referidos a la concentración de Na, existe bibliografía con datos contradictorios: Reynolds et al. (1989) y Jackson et al. (2005) argumentan que las forestaciones incrementan las concentraciones de Na conjunto con la acidez del agua, mientras que por otro lado, otros estudios como Harding & Winterboun (1995) y Noretto et al. (2008) no encontraron ninguna diferencia en las concentraciones de sodio en agua asociada a los diferentes usos de la cuenca. Sin embargo, existen resultados (Farley et al., 2009) que coinciden con el presente meta-análisis, los cuales indican que existe un descenso del Na en los cursos de agua cercanos a las forestaciones, sugiriendo la posibilidad de que los resultados sean debido a diferencias en la concentración inicial de Na en la tierra. De todas formas las pruebas estadísticas con respecto al sodio fueron poco significativas.

A su vez, la escasa cantidad de información encontrada con las palabras clave, sugiere que existen pocos estudios científicos comparativos y la necesidad de profundizar más sobre esta temática con un abordaje semi-experimental, como el dado por microcuencas pareadas. Por otra parte, es interesante discutir que varios de los artículos utilizados en este trabajo no presentaban como temática central el efecto de la forestación sobre la calidad del agua en sí, sino que se centraban en el efecto de la forestación sobre organismos indicadores de calidad de agua. Por lo tanto, se puede sugerir que el nivel de importancia que tiene este tema a nivel global es menor que el que se esperaba encontrar, o que las formas de analizar el tema han sido predominantemente otras. Además, si bien se encontraron pocos artículos, la mitad de ellos se dividen entre tres países (Nueva Zelanda, Argentina y Uruguay), por lo que se podría sugerir que sí existe un sesgo geográfico. Sin embargo, es interesante notar que en los tres países la forestación comercial avanza rápidamente. En Argentina sucede lo mismo que en Uruguay: la forestación se incrementa con mucha rapidez con fines económicos (el incremento

de la forestación es de 30 000 ha /año en 1996 a 100 000 ha/ año en 2001 (Nosetto, et al., 2005) mientras que en Nueva Zelanda la forestación comercial comenzó en el año 1960 (McWethy et al., 2009), teniendo en el año 2006 1,8 millones de hectáreas de plantaciones (WMR 2006). Por otro lado, la cantidad de artículos encontrados fue escasa por lo que no podemos aseverar que el sesgo es sólo geográfico, sino que podría existir un sesgo en cuanto a este tipo de estudio (i.e. cuencas similares pareadas).

Efectos de la forestación en la calidad de agua a escala local

Al analizar los resultados de este estudio se puede concluir que, en contra de lo esperado en las hipótesis, no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de la mayoría de los nutrientes, pH, ni en la concentración de materia orgánica entre los arroyos con forestación y arroyos con pastura comparados en el presente estudio. Sin embargo, se encontró evidencia que sugiere que los efectos de la forestación dependerían de las condiciones climáticas locales, ya que al aumentar las precipitaciones las concentraciones de fósforo en agua parecen aumentar en mayor magnitud en los arroyos forestales en que en los de pastura.

Como se expuso en la discusión del primer objetivo, no todos los sistemas demostraron efectos claros de la forestación sobre la calidad del agua. Si bien al comparar la media de las concentraciones de nutrientes entre las cuatro microcuencas, no se encontró ningún patrón asociado a un cambio en la calidad de agua en términos generales, con la conductividad sí se pudo encontrar un patrón: hubo mayor conductividad en los arroyos con forestación que en los arroyos con pastizal. Este parámetro aumenta a medida que aumentan las concentraciones de sales en las aguas (Mejia, 2005). Este indicador resultó mayor en los arroyos con forestación, por lo que se puede decir que el uso de suelo forestal podría provocar cierta salinización de las aguas. Si bien este resultado no se puede ver respaldado en la literatura (no se encontraron resultados específicos

que demuestren la salinización de los arroyos cercanos a forestaciones), existe literatura que demuestra que el establecimiento de forestaciones en pastizales de llanura en presencia de aguas subterráneas genera cambios en la dinámica de las aguas (asociados a una mayor demanda hídrica de los árboles), que creciendo a expensas de napas puede provocar acumulación de sales en los suelos, zonas vadosas y acuíferos (Jobbágy & Jackson, 2004; Jobbágy et al., 2008).

Por otro lado, al resto de las variables que presentaron diferencias estadísticamente significativas (Alcalinidad en las cuatro microcuencas; cloruros, fósforo reactivo soluble, amonio, sodio y magnesio en los arroyos de Capilla Vieja; y Nitrógeno total disuelto en los arroyos de Nueva Esperanza), no se le encontró ninguna relación coincidente con estudios anteriores.

Al observar la relación entre los nutrientes encontrados en agua y las precipitaciones de las 72 horas previas al muestreo, fue notorio que el fósforo total respondió a la lluvia de una forma distinta que el resto de las variables. Esto puede deberse a que en eventos de lluvia copiosos se genera arrastre de los nutrientes presentes en la superficie del suelo, en especial del fósforo en los suelos erosionados, que percolan al subsuelo o escurren en el agua superficial (Tsegaye et al., 2006). En general, la pérdida de fósforo desde plantaciones suele depender de la cantidad de limo y arcilla en la superficie del suelo (Berg & Carter, 1980) ya que el fósforo se adsorbe a las mismas y es transportado con el material particulado hacia los arroyos, y también depende del grado de erosión de los suelos (Tsegaye et al., 2006). Los suelos forestales tienden a ser más erosionados que los suelos de los pastizales, tanto por la desaparición del sotobosque por efectos de la sombra, como por acumulación de hojarasca y por alelopatía por fenoles de *Eucalyptus* spp que limita el crecimiento de muchas otras especies vegetales (Ballesteros et al., 2006). Además, los *Eucalyptus* generan que el suelo sea menos permeable por la proliferación de hongos, que impiden que el agua penetre en la tierra aumentando así la erosión superficial (Céspedes-Payret et al., 2009). Asimismo, a este proceso de erosión del suelo, se le suma muchas veces el

uso de fertilizantes que se usan en el mantenimiento de las plantaciones forestales (Rosoman, 1994).

El muestreo del 19 de octubre 2014 indicó valores de lluvia alrededor de los 25mm/72horas (Figura 7 C). Si bien la lluvia de esos tres días se la puede considerar como voluminosa, en nuestro país esa cantidad de lluvia no suele ser infrecuente si se toma en cuenta que es la suma de tres días. Los eventos de lluvia extremos (percentil 75) en la región norte de nuestro país, en especial en Paysandú, rondan los 23 mm/día (Instituto Uruguayo de Meteorología, 2016). De este modo, parece escurrir más fósforo desde las cuencas de los arroyos forestados que de los no forestados (Figura 7 B), al menos cuando existen eventos de lluvias copiosos (y no tan copiosos como en esta oportunidad).

El fósforo es un nutriente limitante de la producción primaria acuática, y en exceso actúa como un importante contaminante de las aguas ya que contribuye a la ocurrencia de blooms de productores primarios (microalgas, cianobacterias y plantas acuáticas) y a la eutrofización en general. Los arroyos con alto contenido de fósforo están relacionados a cambios en la intensidad de uso de tierra, ya que este nutriente está asociado al ingreso de efluentes industriales y domésticos, suelos erosionados (Tsegaye et al., 2006) o sobre-fertilizados, y también está relacionado a distintos usos agrícolas y ganaderos, ya que este nutriente, además de llegar asociado a partículas de sedimento también llega de forma disuelta a los arroyos (Sabater et al., 2009; Goyenola et al., 2015). En nuestro país, las concentraciones de fósforo en las aguas superficiales se han incrementado notoriamente en la última década (UDELAR, 2013).

Es importante destacar que la estrategia de monitoreo seguida en este estudio (i.e. baja frecuencia) tiene limitaciones con respecto a detectar patrones que se dan en momentos clave, por ejemplo eventos de precipitaciones con alta descarga en corto tiempo (como suele ocurrir en nuestro país), en los que el fósforo es escurrido en mayor cantidad hacia los arroyos (Goyenola et al., 2015), o momentos claves como la plantación o la cosecha en los que hay grandes movimientos de tierra que arrastran al agua considerables cantidades de materia

orgánica. Este tipo de estudio se vería favorecido si se tuviese más muestreos, en especial en momentos clave como lo son las precipitaciones de alto o mediano volumen. En estos tipos de eventos se esperaría que hubiera una diferencia aún mayor en la concentración de fósforo entre ambos usos del suelo. A su vez, también se logra ver una pérdida de fósforo en el ambiente de pastura. Esto puede deberse al tipo de suelo, a la erosión natural por la lluvia y/o a que la pastura sea utilizada en gran intensidad, es decir sea sobrepastoreada, lo que la hace más susceptible a la erosión como se ha observado en otros trabajos (Jones & Holmes, 1985). Lamentablemente no se cuenta con este tipo de información sobre las microcuencas estudiadas como para analizar estos posibles mecanismos. Sin embargo, al ver los resultados obtenidos de la cuenca Nueva Esperanza se concluye que, si bien la concentración de fósforo en agua aumentó en el arroyo con forestación, el arroyo con pastura no presentó un cambio en la concentración de fósforo con un aumento de precipitaciones, lo cual sugiere que el arroyo con pastura no sería afectado por las precipitaciones menores a 25mm/72horas. Sin embargo, dada la escasez de datos, no se puede predecir aún cómo el sistema reaccionaría ante precipitaciones más fuertes.

5) Conclusiones y perspectivas

A modo de conclusión, se puede decir que en este estudio se encontró evidencia que apoya una de las hipótesis planteadas inicialmente: se observó un aumento de la concentración de un nutriente clave (Fósforo total) en los arroyos con forestación respecto a arroyos similares no forestados, el cual solo se pudo visualizar en los eventos de abundante precipitación, lo cual podría indicar que existen efectos de la forestación en la calidad de agua. Sin embargo, esto es altamente dependiente de las condiciones ambientales locales, tales como las precipitaciones, y tal vez la topografía y el tamaño de la cuenca, siendo únicamente visible en eventos de precipitaciones altas. Por lo tanto, es importante destacar que la mayoría de las variables no mostraron diferencias significativas en los momentos de flujo basal, pero sí parece haber un aumento de la concentración

de fósforo (indicador de detrimento en la calidad de agua) cuando las precipitaciones aumentan.

Es probable que en un futuro cercano en el Uruguay aumente la cantidad de hectáreas forestadas por la posible instalación de una tercera planta de producción de celulosa de gran magnitud (e.g. Diario El País, 17/7/2016), por lo que se plantea como un desafío y necesidad aumentar la frecuencia de muestreos y el número de sitios estudiados para tener la oportunidad de monitorear en momentos de altos volúmenes de precipitaciones (entre otros escenarios climáticos) y bajo distintas condiciones ambientales, y quizás también monitorear arroyos que tengan un mayor caudal.

Como perspectiva a una futura investigación para evaluar el impacto de una de las principales actividades productivas del Uruguay, se plantea aumentar la cantidad de muestreos en el tiempo como se menciona en el párrafo anterior (e.g. mediciones continuas con sondas), también sería muy útil tomar mediciones in situ, como por ejemplo pH y conductividad para obtener valores más certeros, y por último planteo incluir al experimento indicadores biológicos (bioindicadores), como por ejemplo macroinvertebrados o perifiton, este método le puede aportar al estudio una visión más integral del sistema y además retrospectiva de las cualidades del medio en el que se desarrollan los organismos.

6) Bibliografía

- Alfredsson H., Condon L.M., Clarholm M., Davis M.R. 1998. Changes in soil acidity and organic matter following the establishment of conifers on former grassland in New Zealand. *Forest Ecology and Management*. Vol.112. 245-252.
- Allan J.D., Castillo M.M. 2007. *Stream ecology: structure and function of running waters*. Segunda edición.
- APHA, 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. APHA/ AWWA/ WPCF. :1268. Washington, USA.
- Arocena, R.; Conde, D. 1999. Capítulos 8, 9, 10 y 11. *Métodos en ecología de aguas continentales*. D.I.R.A.C. Facultad de Ciencias. Montevideo. UY
- Baldi G., Noretto M.D., Jobbágy E.G. 2008. El efecto de las plantaciones forestales sobre el funcionamiento de los ecosistemas sudamericanos. *Ambiência*. Vol.4. Edición especial:23-34. Guarapuava, PR
- Ballesteros, S.I., Bertón, J.A., Collado, A.D., Echeverría, J.C., d ' Hiriart, A., Giulietti, J.D., Gómez, M.M., Gómez Hermida, V.F., Jobbágy, E.G., Noretto, M.D. 2006. *Aptitud forestal de la provincia de San Luis*. San Luis. AR.
- Berg, R.D., Carter, D.L. 1980. Furrow erosion and sediment losses on irrigated cropland. *Journal of Soil and Water Conservation*. Vol.35. 6:0-3.
- Berthrong, S. T., Jobbágy, E. G., & Jackson, R. B. 2009. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon, and nitrogen with afforestation. *Ecological applications*. Vol.19. 8:2228-2241.
- Brown AE., Zhang L., McMahon TA., Western AW., Vertessy RA. 2005 A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* Vol.310. 28–61
- Céspedes-Payret, C., Piñeiro, G., Achkar, M., Gutiérrez, O., Panario, D. 2009. The irruption of new agro-industrial technologies in Uruguay and their environmental impacts on soil , water supply and biodiversity : A review. Vol.3. 2.
- Chalar G., Arocena R., Pacheco JP., Fabián D. 2010. Trophic assessment of streams in Uruguay: A Trophic State Index for Benthic Invertebrates (TSI-BI). *Ecological Indicators*. Vol 11. 2: 362–369. Montevideo. UY
- Cooper AB., Thomsen CE. 1988. Nitrogen and phosphorus in streamwaters from adjacent pasture, pine, and native forest catchments. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. Vol.22. 2: 279-291
- Duarte CM., Benito SAG., Dachs J., Montes C., Pardo M., Ríos AF., Simó R., Valladares F. 2006. *Cambio global: impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Consejo superior de investigaciones científicas. Madrid. ES.
- Diario El observador 10 de Mayo de 2016 (http://elobservadormas.com.uy/noticia/2015/12/02/41/agua-de-rios-en-uruguay-esta-llegando-a-sus-limites-para-potabilizarla_701347/)
- Diario El País 17 de Julio de 2016 (<http://www.elpais.com.uy/opinion/editorial/regreso-papeleras-editorial.html>)
- DIEA-MGAP, 2003. *Anuario Estadístico Agropecuario*. Montevideo. UY.
- FAO, 2000. *Relaciones tierra-agua en cuencas hidrográficas rurales*. Actas del taller electrónico organizado por la Dirección de Fomento de Tierras y Aguas de la FAO.

FAO, 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010. Estudio FAO: Montes 163

Farley, K.A., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B. 2005. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*. Vol.11. 10:1565-1576.

Farley, K.A., Piñeiro, G., Palmer, S.M., Jobbágy, E.G., Jackson, R.B. 2008. Stream acidification and base cation losses with grassland afforestation. *Water Resources Research*. Vol.45. 7-59:72

Goyenola, G., Meerhoff, M., Teixeira-De Mello, F., González-Bergonzoni, I., Graeber, D., Fosalba, C., Vidal, N., Mazzeo, N., Ovesen, N. B., Jeppesen, E., Kronvang, B. 2015. Monitoring strategies of stream phosphorus under contrasting climate-driven flow regimes. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol.19. 10: 4099-4111.

Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. 2006. Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. Vol 4. 5:9

Harding, J.S. & Winterbourn, M.J. 1995. Effects of contrasting land use on physico-chemical conditions and benthic assemblages of streams in a Canterbury (South Island, New Zealand) river system. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. Vol. 29. 4:479-492.

Holguín C., Rubio H., Olave ME., Saucedo S., Gutiérrez M., Bautista R. 2006. Calidad del agua del río conchos en la región de Ojinaga, Chihuahua: Parámetros fisicoquímicos, metales y metaloides. *Universidad y Ciencia*. Vol. 22. 2: 51-64.

Hornung, M., Reynolds, B., Stevens, P.A., Neal, C. 1987. Stream acidification resulting from afforestation in the UK: evaluation of causes and possible ameliorative measures. *Forest Hydrology and Watershed Management*. Vol. 167:65-74.

Instituto Uruguayo de Meteorología: INUMET, 2016. Datos no publicados.

Jackson R.B., Jobbágy E.G., Avissar R., Roy S.B., Barrett D.J., Cook C.W., Farley K.A., le Maitre D.C., McCarl B.A., Murray B.C. 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*. Vol.310. 5756:1944-1947.

Jobbágy E.G., Piñeiro G., Noretto M.D., Paruelo J.M. 2006 Las forestaciones rioplatenses y el agua. *Ciencia Hoy*. Vol.95. 12:21.

Jobbágy E.G., Vasallo M., Farley K.A., Piñeiro G., Garbulsky M.F., Noretto M.D., Jackson R.B., Paruelo J.M. 2006. Forestación en pastizales: hacia una visión integral de sus oportunidades y costos ecológicos. *Agrociencia*. Vol. 10 : 109-124

Jobbágy E.G., Jackson R.B. 2003. Patterns and Mechanisms of Soil Acidification in the Conversion of Grasslands to Forests. *Biogeochemistry*. Vol.64. 2:205-229.

Jobbágy E.G., Jackson R.B. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology*. Vol.10. 8:1299-1312.

Jobbágy, E.G., Noretto, M.D., Santoni, C.S., Baldi, G. 2008. El desafío ec hidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura chaco-pampeana. *Ecología Austral*. Vol.18. 3: 305-322

Jones, R.C., Holmes, B.H. 1985. Effects of land use practices on water resources in Virginia. *Virginia Water Resources Research Center*. Vol. 144:1-144

Koroleff F. 1970. Revised version of direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. *Int. Con. Explor. Sea C M 1969/C9. ICES, Information on techniques and methods for sea water analysis. Interlab Rep.* 3:19-22

- Lu Y., Bauer JE., Canuel E.A., Yamashita Y., Chambers R.M., Jaffé R. 2013. Photochemical and microbial alteration of dissolved organic matter in temperate headwater streams associated with different land use. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. Vol. 118. 2: 566-580
- Machín J., Navas A., Domenech S., Lopez-Vicente M, 2005. El río Arlanza en cabecera: evolución reciente y tendencias en condiciones de cambio global Cuadernos de Investigación Geográfica. Vol 31. 77-95
- Marschner P. 1995 Marschner's Mineral Nutrition Higher Plants. 2° Edition. Academic Press, Elsevier.
- Márquez J.A, Cibils L, Principe R.E, Albariño R.J. 2015. Stream macroinvertebrate communities change with grassland afforestation in central Argentina. *Limnologia*. Vol.53: 17–25
- McWethy D.B, Whitlock C, Wilmschurst J.M, McGlone M.S, Li X. 2009. Rapid deforestation of South Island, New Zealand, by early Polynesian fires. *The Holocene*. Vol.19. 6: 883-897
- Mejía M.R. 2005. Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria, en la microcuenca El Limón. Tesis de Magister. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. San Jerónimo. HN
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and human well-being: Health Synthesis. World Health Organization
- Miserendino ML, Masi CI. 2010. The effects of land use on environmental features and functional organization of macroinvertebrate communities in Patagonian low order streams. *Ecological Indicators*. Vol.10. 2: 311-319
- Miserendino M.L., Casaux, R., Archangelsky, M., Di Prinzio, C.Y., Brand, C., Kutschker, A.M. 2011. Assessing land-use effects on water quality, in-stream habitat, riparian ecosystems and biodiversity in Patagonian northwest streams. *Science of the Total Environment*. Vol.409. 3:612-624. Patagonia. AR
- Müller R., Widemann O. 1995. Die bestimmung des nitrat-ions in wasser. *Von Wasser* 22:247.
- Murphy J., Riley JP. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim.* 27:31-36.
- Nosetto M.D. 2007. Conversión de pastizales en forestaciones: impactos sobre la dinámica del agua y las sales. Tesis de Doctorado. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires. AR
- Nosetto MD., Jobbágy EG., Paruelo JM. 2005. Land-use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*. Vol. 11. 7: 1101-1117.
- Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Tóth, T., Jackson, R.B. 2008. Regional patterns and controls of ecosystem salinization with grassland afforestation along a rainfall gradient. *Global Biogeochemical Cycles*. Vol.22. 2:1-12.
- Oficina de Planeamiento y Presupuesto. 2015. Reporte Uruguay.1° Edición. Dirección de presupuestos, control y evaluación de la gestión. Montevideo. UY
- Ormerod SJ., Donald AP., SJ. 1989. The influence of plantation forestry on the pH and aluminium concentration of upland welsh streams: A re-examination..:47-62
- Oyarzún CE. & Huber A. 2003. Nitrogen Export From Forested and Agricultural Watersheds of Southern Chile. *Gayana. Botánica*. Vol.60. 1:63-68

- Pérez-Arrarte C. 2007. Plantaciones forestales e impactos sobre el ciclo del agua: Un análisis a partir del desarrollo de las plantaciones forestales en Uruguay. Editora: Hersilia Fonseca. Grupo Guayubira. UY
- Petersen I., Masters Z., Hildrew A.G., Ormerod S.J. 2004. Dispersal of adult aquatic insects in catchments of different land use. *Journal of Applied Ecology*. Vol. 41: 934-950.
- Proyecto alianzas ANII- FJR 2016. Informe final. “Red de microcuencas experimentales para la obtención de indicadores hidrológicos y edáficos en plantaciones forestales”
- Quinn JM & Stroud MJ. 2002. Water quality and sediment and nutrient export from New Zealand hillland catchments of contrasting land use. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. Vol 36. 2: 409-429.
- R Core Team (2016) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reynolds B., Hornung, M., Hughes, S. 1989. Chemistry of streams draining grassland and forest catchments at Plynlimon, mid-Wales. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*. Vol.34. 6: 667-686.
- Rosoman, G. 1994. The Plantation Effect: An Ecoforestry Review on the Environmental Effects of Exotic Monoculture Tree Plantations in Aotearoa/New Zealand. Greenpeace New Zealand.
- Sabater S., Donato JC., Giorgi A., Elozegi A. 2009. Conceptos y técnicas en ecología fluvial: El río como ecosistema. Capítulo 2.
- Silveira L., Alonso J., Martínez L. 2006 Efecto de la plantaciones forestales sobre el recurso agua en el Uruguay. *Agrociencia*. Vol.X. 75-94.
- Tsegaye, T., Sheppard, D., Islam, K R., Johnson, A., Tadesse, W., Atalay, A., Marzen, L. 2006. Development of chemical index as a measure of in-stream water quality in response to land-use and land cover changes. *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol. 174:161–179.
- UDLAR, 2013. Informe Universitario sobre la calidad del agua en la cuenca del Río Santa Lucía: estado de situación y recomendaciones
- Valderrama JC. 1981. The simultaneous analysis of total Nitrogen and total Phosphorus in natural waters. *Mar. Chem.* 10:109-122.
- Vitousek, Peter M. 1994. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*. Vol.75. 7:1861-1876. Stanford, CA.
- Wagner PB. 2008. Efectos iniciales de la aforestación sobre la calidad de agua de escurrimiento en una cuenca del río Tacuarembó. Tesis de Maestría. Facultad de Agronomía. Universidad de la República. Montevideo. UY
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3'd Edition. Academic Press, San Diego, CA.
- WRM. 2006. Movimiento mundial por los bosques tropicales. *Boletín* N° 105.
- Young R.G., Quarterman A.J., Eyles R.F., Smith R., Bowden W.B. 2005 Water quality and thermal regime of the Motueka River: Influences of land cover, geology and position in the catchment. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. Vol 39. 4: 803-825
- Young, W.J., Marston, F.M. Davis, J.R. 1996. Nutrient exports and land use in Australian catchments. *Journal of Environmental Management*. Vol.47. 2:165–183

Zhang L., Dawes W.R., Walker G.R. 1999. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Technical Report.

Zhang Y., Liu S., Wei X., Liu J., Zhang G. 2008 Potential impact of afforestation on water yield in the subalpine region of southwestern China. *Journal of the American water resources association*. Vol 44. 5: 1144-1153

Anexo I: Fragmento del decreto N 450/988 del año 1988. Destaco lo que a mi parecer es relevante para el contexto de este informe con fuente subrayada.

Decreto N° 450/988

Fecha de Publicación: 22/07/1988

Página: 113-A

Carilla: 3

MINISTERIO DE GANADERIA, AGRICULTURA Y PESCA

Artículo 2

PLAN NACIONAL DE FORESTACION

IX) Beneficios del Plan de plantaciones forestales

La implementación de un programa sostenido de plantaciones forestales además de revertir la situación existente contribuirá con múltiples beneficios tanto desde el punto de vista económico, como social y ambiental.

1) Desde el punto de vista económico. La plantación es la primer etapa de un proceso en el que se continúan las podas, raleos, la explotación y la producción industrial. Aún superficies pequeñas de bosques permiten la instalación de industrias forestales pequeñas a medianas. El bosque es flexible en cuanto a su aprovechamiento, pudiendo orientarse su comercialización de acuerdo a la situación que impere en el mercado a diferentes industrias (aserrío, pulpa, tableros, leña), lo que reduce el riesgo de la inversión.

La actividad forestal tiene fuertes interdependencias con los demás sectores de la economía ya que sus productos son insumos de gran número de industrias. Asimismo, el desarrollo forestal estimula la demanda por productos derivados de la madera y al mismo tiempo estimula la demanda de insumos para el propio sector.

2) Desde el punto de vista social. La actividad forestal está orientada hacia las zonas rurales y por lo tanto el desarrollo de

programas forestales contribuye a solucionar los problemas de centralismo y crea desarrollo regional especialmente en las zonas con mayor pobreza de infraestructura. La implementación del citado programa de 100.000 Hás. de forestación supondrá la creación de 3.000 empleos estables durante 25 años solamente en el sector primario.

Debemos además tener en cuenta que la actividad forestales es fuente de trabajo desde la producción hasta el consumo del producto final, permitiendo dar empleo a personas con diferente grado de calificación. Además el desarrollo de programas forestales conlleva al desarrollo de la infraestructura de caminos, de construcciones y de servicios, y mejora por lo tanto la participación del trabajador en un proceso de integración regional y nacional.

3) Desde el punto de vista ambiental. El bosque y el árbol son factores de embellecimiento del paisaje mejorando la calidad de vida de los pobladores y contribuyendo al desarrollo del turismo. Asimismo, son de particular importancia en la regulación de los procesos erosivos, controlando el escurrimiento del agua, impidiendo a la sedimentación de los ríos y aumentando al mismo tiempo la vida útil de obras de ingeniería tales como los embalses y represas hidroeléctricas. Finalmente debemos consignar que el bosque da refugio a la fauna autóctona e introducirá, permitiendo por lo tanto la renovación de ese recurso.