

# **Hidrología, Calidad de Aguas y Agricultura. El caso del Sur de Florida (EEUU)**

Rafael Muñoz-Carpena

Assistant Professor, Hydrology & Water Quality, University of Florida, Agricultural and Biological Engineering Department, IFAS-Tropical Research and Education Center, 18905 SW 280 Street, Homestead, FL 33031-3314, email: carpena@ufl.edu

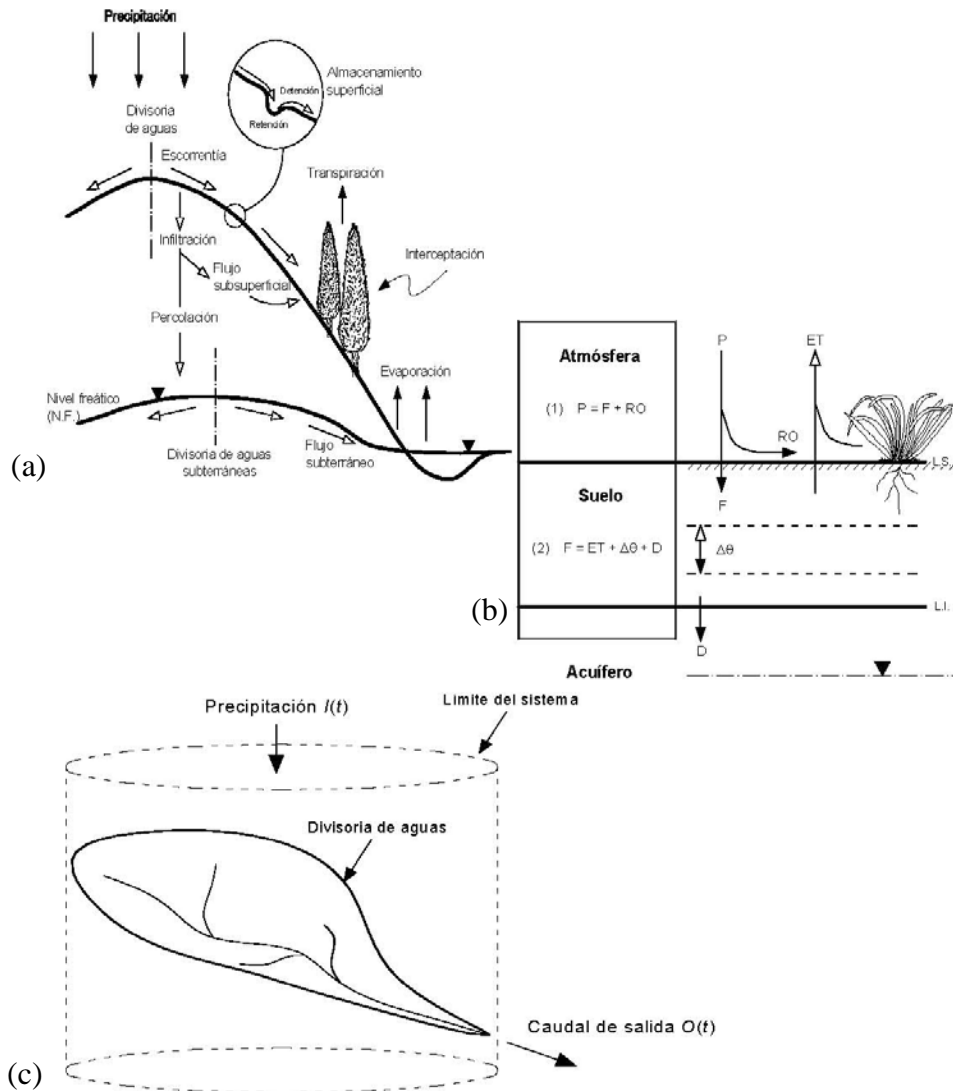
## **IMPORTANCIA DE LA HIDROLOGÍA AGRÍCOLA**

¿Cuáles son los recursos hídricos disponibles?. ¿Es la explotación actual equilibrada o avanzamos hacia la desertificación?. ¿Representa la contaminación actual del agua un riesgo?. ¿Podemos recuperar la cantidad y calidad de nuestros recursos?. ¿Cuál es el impacto actual y futuro de estas cuestiones en el medio agroforestal?.

Todas estas preguntas entran dentro del ámbito de la Hidrología. Su estudio entraña gran dificultad porque debemos enfrentarnos a dos hechos básicos. Por un lado, la imprevisibilidad del tiempo atmosférico que condiciona localmente la radiación solar en la superficie del suelo (motor del ciclo hidrológico) y las lluvias; componente fundamental del ciclo que condiciona la disponibilidad del agua como recurso. Por otro lado, la enorme heterogeneidad del sistema hidrológico (atmósfera, vegetación, fisiografía del terreno, suelo y subsuelo) dificulta el estudio y la predicción de su comportamiento.

El tratamiento de estos temas en el dominio agroforestal obliga a un cambio de escala espacial y temporal con respecto a la normalmente empleada en otros dominios como en la ingeniería civil. La unidad de estudio agroforestal es normalmente a escala de cuenca o subcuenca de dimensiones pequeñas, pudiéndose considerar incluso el campo o parcela agrícola en ocasiones como cuenca hidrológica, o a escala puntual para el estudio del balance o flujo de agua y solutos a nivel de suelo (normalmente en forma unidimensional) (Fig. 1). Uno de los retos de la *Hidrología Agroforestal*, la de interés para el Ingeniero Agrícola, es su interrelación con el manejo y conservación del agua y el suelo, no sólo en

su cantidad, sino especialmente de su calidad. Otra particularidad de dominio agroforestal es que la mayoría de los procesos de contaminación del agua son del tipo denominado como *difuso* (no puntual) frente a los de tipo *puntual* más típicos de la actividad industrial y urbana. Puesto que el agua es el mecanismo de transporte de los contaminantes, la base de la protección de nuestros recursos es precisamente la Hidrología. Sin un conocimiento detallado de esta disciplina difícilmente se podrá avanzar en la protección medioambiental.



**Figura 1. Escalas de interés en hidrología: (a) pendiente (2D); (b) cuenca (3D); y (c) perfil (1D) (adaptado de Muñoz-Carpena y Ritter, 2004).**

Para obtener respuestas válidas a estos temas, la hidrología debe estudiar sistemáticamente cada uno de los componentes o procesos del ciclo hidrológico, sus bases científicas,

cuantificar su magnitud y definir la interacción con los otros componentes del balance hídrico (Fig. 1a y b).

La *Hidrología Atmosférica* estudia los intercambios entre la atmósfera y la superficie (precipitación, evaporación, condensación y rocío). La descripción de la precipitación ha de incluir, a parte de las bases físicas conocidas, el estudio de la variabilidad espacial y temporal que presenta. La aplicación de las técnicas del análisis de frecuencia en hidrología permite la predicción estocástica de la magnitud de los sucesos extremos de precipitación (periodo de retorno,  $T$ ), de gran importancia en la ingeniería hidráulica como valor de diseño.

La *Hidrología del Suelo* trata de las propiedades físicas del suelo que condicionan su capacidad para absorber (infiltrar) total o parcialmente el agua de lluvia, así como para conducirla a su través hasta zonas más profundas donde se encuentran los acuíferos. A esta zona entre la superficie del suelo y el acuífero se la ha denominado también de manera quizá más correcta *zona-no-saturada* (ZNS) y es de gran interés en hidrología. En sentido amplio, el estudio de la ZNS incluye la transferencia de todas las formas de materia y energía. Sustancias químicas en forma de gas, líquido o sólido se intercambian con los dos medios limítrofes (atmósfera y acuíferos). Los usos del terreno (industriales, agrícolas, residenciales y recreativos, etc.) pueden promover la lixiviación de sustancias químicas hacia los acuíferos causando contaminación. Son por otro lado las especiales circunstancias de presencia de aire, agua, calor, abundancia de elementos químicos y flora vegetal y microbiana lo que posibilita que parte de los contaminantes sean transformados o eliminados al pasar a través de la ZNS. Es pues gracias a ella que la situación de contaminación del agua subterránea, aun preocupante hoy, no ha alcanzado magnitudes superiores (Muñoz-Carpena et al., 1999b). Desde el punto de vista práctico, estos procesos se describen en forma de ecuaciones matemáticas que permiten realizar predicciones de la cantidad de agua (y solutos) que permanece en la superficie al no poder absorberlos el suelo (exceso de lluvia) así como la que drena en profundidad y recarga los acuíferos.

La *Hidrología Superficial* arranca de esa cantidad de agua disponible en superficie y se centra en los procesos de agregación pendiente abajo para dar lugar al fenómeno de la escorrentía. Esta especialidad aborda los métodos de estimación de las variables de diseño relacionadas con la escorrentía en cuencas hídricas agroforestales, muy distintas de las de otros usos del terreno, y también de gran interés en la ingeniería hidráulica.

Por último, la *Hidrología Subterránea* o *Hidrogeología* introduce al estudio de las propiedades del agua subterránea así como de las formaciones geológicas que la contienen, acuíferos, con énfasis en sus características, funcionamiento y explotación para abastecimiento de agua, así como su protección como recurso.

El planteamiento de la Hidrología Agrícola debe ser analítico, dominando lo cuantitativo (cálculos y ecuaciones) frente a lo cualitativo (descripción), con la intención de dotar al Ingeniero Agrícola de una “caja de herramientas” útiles en el diseño hidrológico. Dos factores han contribuido a este enfoque y al espectacular avance que la Hidrología como ciencia e Ingeniería ha experimentado en los últimos 50 años. De un lado el desarrollo de los ordenadores han permitido la solución de ecuaciones complejas y repetitivas, y su aplicación en forma de modelos hidrológicos, una de las herramientas básicas de la hidrología moderna. En este sentido es interesante resaltar que una de las primeras aplicaciones no militares de los primeros ordenadores modernos fue la solución de un modelo de simulación continua de cuenca en la Universidad de Stanford (EEUU) a principios de los años 1960, antes que muchas otras aplicaciones comunes hoy. Por otro lado la mejora de las técnicas de instrumentación y muestreo automático, paralela también al desarrollo de la electrónica, ha hecho posible la medida y parametrización de muchos procesos hidrológicos continuos e intensivos.

Los métodos de caracterización de los procesos de intercambio de agua, energía y solutos con el medio son una parte crítica de la hidrología en ocasiones no suficientemente desarrollada (Muñoz-Carpena y Alvarez-Benedí, 2004). El medio hidrológico es altamente heterogéneo en espacio y tiempo debido a la variedad de sus materiales de partida y sus procesos de formación. Esta heterogeneidad, unida a la gran variabilidad que en espacio y

tiempo presentan las entradas a este sistema (clima, fauna, flora, acción humana, etc.), comporta una gran complejidad y obliga al carácter marcadamente multidisciplinar de la hidrología y sus métodos. Recientemente Alvarez-Benedí y Muñoz-Carpena (2004) abogan por un enfoque integrado en la elección de los métodos de caracterización del medio, que incluya el análisis del modelo conceptual implícito en la descripción de la propiedad que desea medir, su naturaleza intrínseca (variabilidad natural), y uso final (destino) de dicha medida.

Actualmente la aplicación de la Hidrología como herramienta de gestión está dando lugar al establecimiento de planes integrales de manejo que incluyen la conservación de la calidad del medio ambiente, tratamiento y el manejo sostenible de residuos agrícolas y ganaderos, industriales y urbanos. En este contexto es de resaltar el programa popularmente denominado TMDL (Carga Maxima Diaria Total) vigente en EEUU. Aunque el objetivo del programa es simple, proteger las aguas del país, su desarrollo es muy complejo (Bosch, 2003a). La ley americana (Clean Water Act, 1977) obliga a los estados de la unión a publicar cada dos años una lista de aguas superficiales o cuencas que no pueden ser utilizadas para un uso determinado (recreativo, urbano, agroforestal, industrial) debido a la presencia de contaminantes. La ley estipula que dichas cuencas alteradas se clasifiquen en tres niveles de prioridad y se determine el contaminante(s) responsable(s) de que no puedan ser utilizadas. La cantidad máxima del contaminante que la cuenca puede recibir antes de producirse la alteración de la misma se denomina TMDL y se calcula como la suma total de sus componentes (difuso+puntual+natural+margen de seguridad). El desarrollo de este programa ha traído consigo en los últimos años un inventario exhaustivo de recursos hídricos del país y su evaluación. Es de destacar que el plan completo de actuación, aprobado por la US-EPA (Agencia de Protección Medioambiental Americana) es comprensivo al incluir 7 componentes que van desde: 1) la identificación del contaminante, 2) cálculo de la cantidad necesaria para su reducción, 3) identificación de sus fuentes en la cuenca, 4) asignación de las cantidades máximas permitidas a las actividades consignadas en la cuenca, 5) plan de control, 6) plan de seguimiento y

evaluación, 7) revisión del TMDL si procede. El impacto de la adopción del TMDL en EEUU ha sido enorme, no sólo en su coste (entre 63-69 millones de dólares por año para los componentes 1-4 señalados, y entre 900-4300 millones de dólares para los componentes 5-7), sino en la revisión del problema de contaminación y gestión de recursos hídricos que ha provocado (Bosch, 2003b).

## **INVESTIGACIÓN HIDROLÓGICA, AGRICULTURA Y CALIDAD DEL AGUA EN EL SUR DE FLORIDA**

El Sur de Florida (EEUU) es una zona de gran interés hidrológico al contener el ecosistema de los Everglades. Este territorio pantanoso subtropical de gran riqueza ecológica, que ocupa unos de 25500 km<sup>2</sup> desde el sur del lago interior de Okeechobee hasta el Caribe, está amenazado por el intenso plan de drenaje desarrollado alrededor de Miami en la segunda mitad del siglo XX. Aunque dicho proyecto de drenaje fue enormemente exitoso al posibilitar el desarrollo del sureste del estado (la población de Miami era inferior a los 100,000 habitantes a principios del s. XX), sus efectos sobre el Parque Nacional de los Everglades (PNE), zona protegida de 6100 km<sup>2</sup> al suroeste, han sido negativos al eliminar los hidroperiodos naturales de los que depende este frágil ecosistema acuático de agua dulce. El sistema regional de drenaje, constituido por casi de 3000 km de canales, está operado integralmente mediante más de 200 compuertas y estructuras con el objetivo de evitar las inundaciones durante el periodo húmedo (verano), o la sequía por exceso de drenaje durante el invierno. Durante los años 80-90, fruto de la concienciación ciudadana sobre la pérdida de los Everglades, se establecieron las bases para el Plan Comprensivo de la Restauración de los Everglades (CERP), uno de los proyectos ecohidrológicos más ambiciosos y caros de la historia (su coste sobre los próximos años está estimado en 10,000 millones de dólares). Aunque el objetivo es sencillo: "aumentar el aporte de agua a los Everglades", su desarrollo es esta zona densamente poblada (más de 5 millones de habitantes en el cinturón costero de Miami-West Palm Beach) es muy complejo debido a las características hidrológicas del sistema. El acuífero superficial Biscayne que cubre la

zona es uno de los más permeables del mundo, con lo que es técnicamente muy difícil incrementar los niveles de agua en el la zona protegida del PNE al oeste sin afectar la zona desarrollada al este. Recientemente se ha adoptado además una limitación en la calidad mínima del agua que puede verterse al PNE, al establecer que la concentración de fósforo total, el contaminante crítico para la ecología del Parque, debe ser inferior a 0.010 mg/l.

Entre los distinto usos del terreno de la zona desarrollada, es de especial interés el cinturón agrícola de 35000 has. que ocupa la zona intermedia entre el desarrollo urbano costero del este y el borde del PNE. Esta zona ha limitado en parte, y por el momento, el crecimiento desmesurado de la zona de Miami. Aunque no hay discusión sobre el impacto potencial de la actividad agrícola incontrolada sobre el medioambiente, no es menos cierto que el desarrollo urbano o industrial no representa en general una alternativa preferible.

La competencia de los diferentes usos del terreno en la zona (restauración/conservación, agrícola y urbano/industrial) y su impacto sobre la hidrología y calidad de agua de la zona ocupa el centro de la Restauración de los Everglades. En este contexto es urgente la evaluación del impacto de los diferentes usos del terreno sobre el medioambiente, así como el estudio de posibles medidas para controlar dichos impactos, conocidas como catálogo de buenas practicas (BMP). Un gran número de agencias federales (*US Corp of Engineers, USGS, National Park Service, USDA-ARS*), estatales (*South Florida Water Management District-SFWMD, FL-EPA, FL-FDACS*), locales (*South Dade Soil and Water Conservation District-SDSWCD*, diversas asociaciones de productores, ecologistas y ciudadanos) y universidades colaboran conjuntamente en este esfuerzo.

A continuación se describen sucintamente algunos de los proyectos con énfasis en el componente agrícola desarrollados por el Centro Tropical de Investigación y Educación (TREC) de la Universidad de Florida (UF) en colaboración con otras agencias.

**Caso 1: Evaluación del efecto del uso del terreno sobre la hidrología y calidad del agua en una cuenca agrícola en el borde del PNE.**

Es este estudio se obtuvieron series temporales detalladas de los principales componentes del ciclo hidrológico y de variación de calidad de agua en el Frog Pond, una cuenca agrícola de 20 km<sup>2</sup> al borde del PNE (Fig. 2).

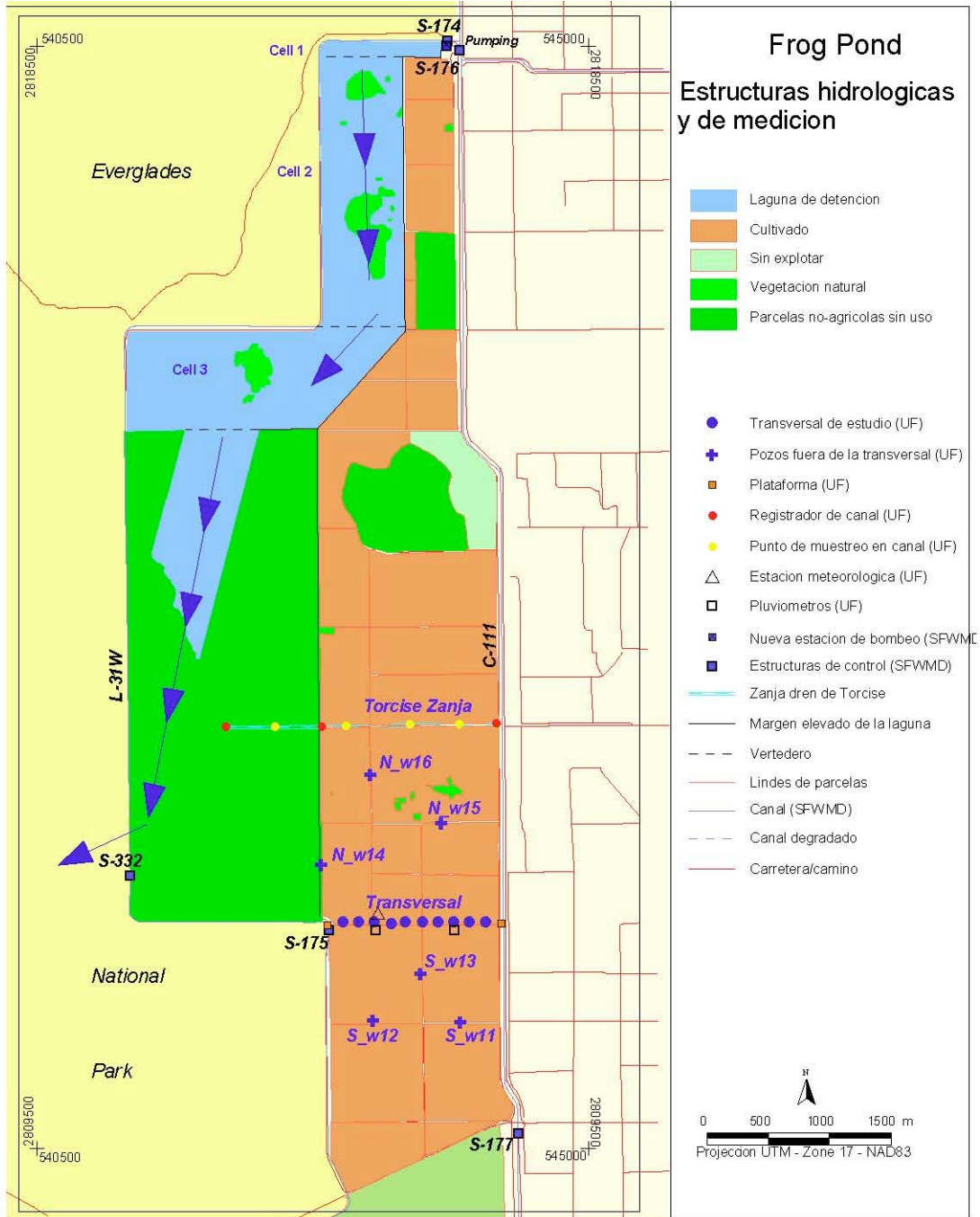
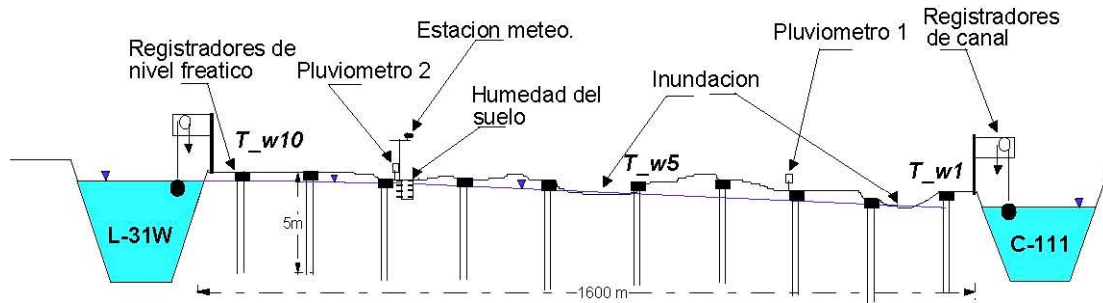


Figura 2. Detalle de la red de seguimiento hidrológico de la cuenca (Ritter y Muñoz-Carpena, 2004)



Esta zona acoge varias acciones relacionadas con el proyecto de Restauración de los Everglades (modificación de la operación de los canales que la rodean y laguna de detención y almacenamiento). Dos canales, C-111 y L-31W operados por varias estructuras rodean la zona (Fig. 2). El nivel de agua del canal L-31W al oeste se mantiene a mayor altura que el del este (C-111), para crear una barrera de gradiente hidráulico que abastezca el Parque mediante flujo subterráneo hacia el oeste, mientras desplaza los posibles retornos de riego hacia el este fuera del alcance del Parque (Muñoz-Carpena y Li, 2003). Este efecto se logra al mantener la compuerta S-175 al sur del canal L-31W cerrada mientras se bombea agua a este canal desde el C-111 al norte. La zona esta afectada por inundaciones en la época lluviosa de verano. El uso del terreno en la zona es agrícola y su distribución espacial compleja (5 agricultores distintos y mas de media docena de cultivos con rotaciones e intercambios de parcelas sucesivas a los largo de los años). Este tipo de uso del terreno agrícola cambiante en espacio y tiempo es común a muchas zonas agrícolas intensivas del mundo y constituye uno de los principales retos al estudiar las interacciones entre hidrología y calidad de aguas en cuencas agrícolas.

La Universidad de Florida estableció en Marzo de 2002 una completa red de seguimiento hidrológico en la zona sur del Frog Pond (3.2 x 3.2 km) con el objeto de estudiar estas interacciones. El sistema se compone de 21 estaciones de medida (16 pozos con registradores automáticos y para muestreo de calidad de agua, 4 plataformas en canales y zanjas de drenaje con registradores de altura de agua y muestreo, y un punto adicional para muestreo) (Fig. 2). Además de pozos en tres de las estaciones se incluyeron una estación meteorológica, 2 pluviómetros y un sistema de medida de humedad del suelo (Fig. 3).



**Figura 3. Detalle de la instrumentación hidrológica empleada en el estudio (transversal) (Ritter y Muñoz-Carpena, 2004).**

Los registros automáticos se realizan cada 15 minutos y los muestreos de calidad del agua cada 2 semanas (Muñoz-Carpena y Li, 2003). Las muestras se analizaron siguiendo procedimientos estandarizados (según la certificación NELAC) para determinar la concentración de 25 contaminantes potenciales incluyendo macroelementos (F, Cl, Br, SO<sub>4</sub>-S, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, P total, Ca, K, Mg, Na), elements traza (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Al, As, Mn, Mo, Se), y pH y EC.

Las series temporales obtenidas se estudiaron con una novedosa técnica en hidrología, el Análisis de Factores Dinámicos, DFA (Muñoz-Carpena et al., 2004; Ritter y Muñoz-Carpena, 2004). Esta técnica está especialmente diseñada para separar los efectos latentes (variabilidad inexplicada) de los efectos conocidos (variabilidad explicada) que condicionan la variación de las series temporales complejas, por ejemplo las del nivel freático o la concentración de un contaminante en el acuífero de la zona. Esta potente herramienta permitió determinar que los factores principales que afectaban el cambio en la profundidad diaria del agua subterránea en la zona, tanto en espacio como en el tiempo, eran las elevaciones de los canales C-111 y L-31W. El método permitió formular un modelo analítico para predecir dicha elevación media diaria en cualquier punto de la zona conociendo sus coordenadas y las alturas de agua en los canales con un error medio en torno a los 0.07 m.

Con respecto a la calidad del agua, el método mostró que la variación mensual de los agroquímicos (formas de N y P) en el agua subterránea está directamente relacionada con el uso local del terreno (agricultura), manejo de los canales, y lluvias de alta intensidad. La

variación de trazadores naturales (Cl y F) en el acuífero superficial reveló un intercambio muy activo entre el acuífero y los canales que rodean la zona. Además del uso agrícola del terreno (incluida en las *Tendencias*) y la consiguiente acumulación de agroquímicos en el suelo (*Suelo*), los factores que más afectan la variación de estos productos en el acuífero son la profundidad del nivel freático en cada momento (*WTD*) y la ocurrencia de lluvias intensas (*aR*) (Tabla 1). En el caso de los trazadores, los principales factores para explicar su variación en el acuífero fueron las concentraciones de estos productos en los canales (*Canal*) y lluvia intensa (*aR*). La baja concentración del amonio observada en la zona permite desenmascarar estos efectos también en este agroquímico (Tabla 1).

**Tabla 1. Efecto relativo de las variables explicativas estudiadas para explicar la variación en la calidad de agua de la zona (Muñoz-Carpena et al., 2004)**

Producto	<i>aR</i> <sup>(1)</sup>	<i>Canal</i> <sup>(1)</sup>	<i>WTD</i> <sup>(1)</sup>	<i>Suelo</i> <sup>(1)</sup>	Tendencias <sup>(2)</sup>	<i>Cd</i> <sup>(3)</sup>
F	2	1	--	--	(1) **	0.64
Cl	2	1	--	--	(1) **	0.84
NH <sub>4</sub> -N	--	1 (transversal)	2	1 (Sur)	(2) ** (norte/sur)	0.69
NO <sub>3</sub> -N	3	--	1	2	(3) **	0.77
PO <sub>4</sub> -P	3	--	1	2	(2) **	0.83
TP	3	--	1	2	(1) *	0.63

<sup>(1)</sup> 1, 2, 3 representan la importancia relativa creciente de las variables explicativas; <sup>(2)</sup> número de tendencias necesarias en paréntesis y \*,\*\*,\*\*\* la media de  $\rho_n = 0.3-0.5, 0.5-0.75, >0.75$ , respectivamente; <sup>(3)</sup> *Cd*= coeficiente de determinación.

Los buenos resultados obtenidos por el modelo de factores dinámicos resultante de la inclusión de estos factores (Tabla 1 y Figura 4) dan confianza a la interpretación obtenida de la interacción entre agricultura, hidrología y calidad de agua en la zona mediante DFA. Este conocimiento permite establecer recomendaciones para la posible reducción de contaminantes en la zona, por ejemplo el mantenimiento de los canales al nivel más bajo posible, o el ajuste del calendario y cantidad de aplicación de los agroquímicos para evitar la acumulación en el suelo y su lavado con lluvias intensas.

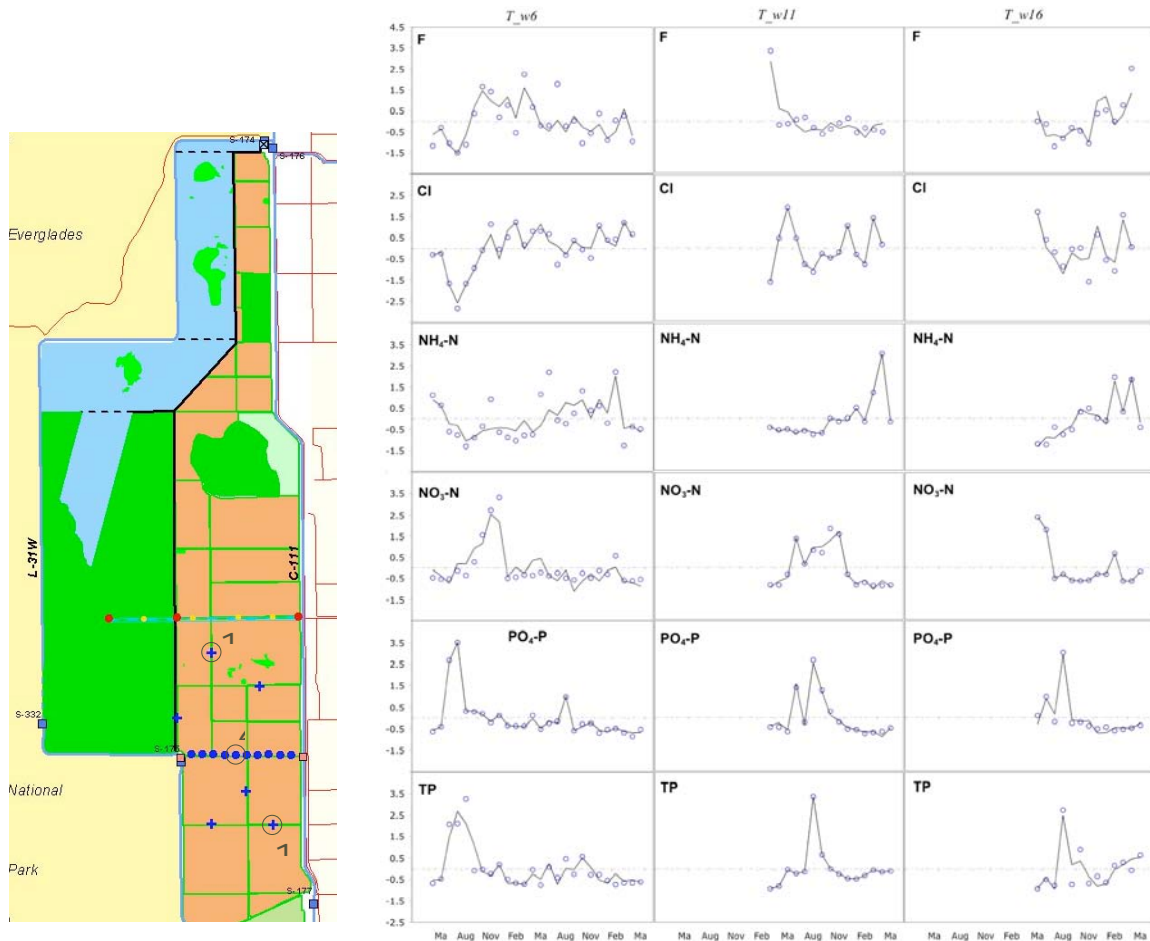


Figura 4. Ajuste del modelo para tres de los productos químicos estudiados a lo largo de la transversal NE a SO a través de los pozos 1-11-16. Las líneas representan la simulación del modelo y los círculos los datos observados (Muñoz-Carpena et al., 2004).

## Caso 2: Evaluación de una BMP, cultivo de cubierta de verano, para la reducción del lixiviado del pesticida atrazina hacia el acuífero superficial.

La zona agrícola intensiva del condado de Miami-Dade (en el extremo sur de Florida) es única en EEUU al ser la única de su territorio continental donde es posible producir cultivos tropicales así como verduras frescas durante los meses invernales. Esta horticultura intensiva está asociada a un uso elevado de agroquímicos. Las condiciones hidrogeológicas de la zona (acuífero extremadamente permeable y muy superficial) sugieren que esto puede amenazar la calidad del agua de la zona. Durante 4 años, 1999-2003, Potter et al. (2004a) llevaron a cabo un estudio en el TREC para evaluar la lixiviación potencial del herbicida atrazina (usado en la producción de maíz dulce, *Zea*

*mays L.*, en invierno) y sus derivados hacia el acuífero superficial, y su posible reducción mediante el uso de un cultivo de cubierta leguminoso (*Crotalaria juncea L.*) en la época de no-cultivo (verano). El estudio se realizó en un campo experimental con 6 parcelas de 0.15 ha cada una cultivadas con maíz dulce de manera uniforme durante el invierno de los 4 años, y dejando en verano 3 de las parcelas en barbecho (suelo al descubierto con laboreo) (B) y las otras 3 bajo cultivo de cubierta (CC). Al final de cada verano la cubierta se incorporó al suelo como abono verde. Para el seguimiento del agua subterránea somera se instalaron 31 pozos de 5 m de profundidad cubriendo el campo en una malla, de manera que se contaba con pozos aguas arriba (pendiente hidráulica) o de entrada en las parcelas, y pozos en cada uno de los dos tipos de parcelas (B y CC). La pendiente hidráulica se estableció mediante un estudio hidrológico detallado mediante el seguimiento automatizado continuo de elevaciones del nivel freático en 6 de los pozos de la malla y manual bi-semanal en todos los pozos previo al muestreo, y una serie de estudios de trazadores realizados al final del invierno. Los pozos se muestrearon bi-semanalmente y se analizaron para obtener la concentración del herbicida y sus derivados. El maíz se cultivo de acuerdo a las prácticas comerciales típicas de la zona.

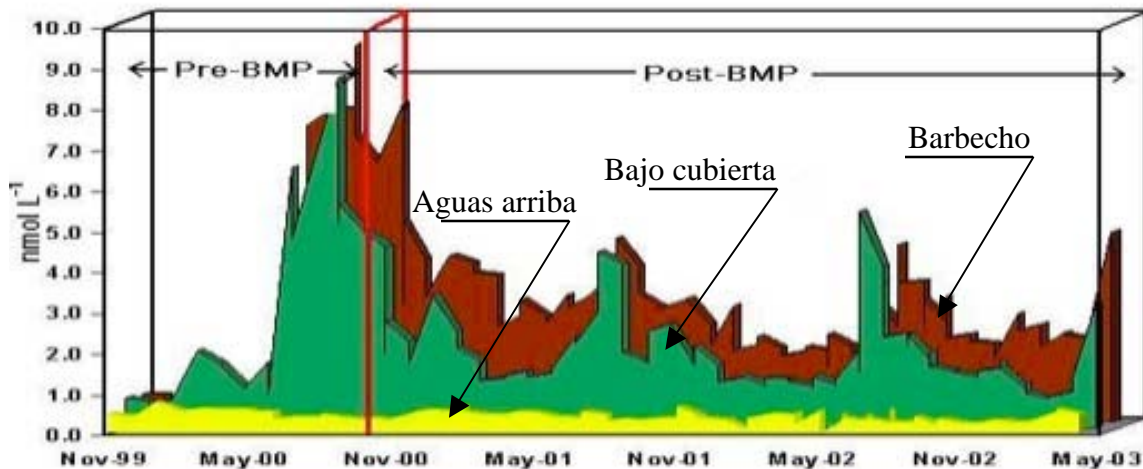


Figura 5. Reducción de atrazina en el acuífero por efecto del cultivo de cubierta (adpt. de Potter et al., 2004a)

Aunque las concentraciones de atrazina encontradas en el agua subterránea fueron relativamente bajas, se observaron tendencias claras estacionales en las que la concentración del producto era muy baja al principio del verano (época lluviosa) e incrementaba al principio del cultivo invernal con los tratamientos al maíz (Fig. 3). El uso de la cubierta de verano redujo la concentración de atrazina un 35% en el agua subterránea local, siendo estos resultados estadísticamente significativos (Potter et al, 2004b).

Muñoz-Carpena et al. (2002) demostraron mediante el uso de técnicas numéricas avanzadas basadas en la inversión de un modelo de flujo de agua y solutos en el suelo en diferencias finitas (WAVE), que los cambios en las propiedades físicas introducidas en el suelo por el cultivo de cubierta después de varios ciclos eran suficientes para incrementar la capacidad de retención del suelo y por lo tanto reducir el drenaje profundo y lixiviado potencial hacia el acuífero. El incremento de materia orgánica también modificó la adsorción química del herbicida aumentando así la oportunidad de su degradación. Estos resultados, en combinación con otros beneficios conocidos del uso de *Crotalaria* (incremento de fertilidad del suelo por fijación de N como leguminosa, y supresión de nemátodos), indican que el uso de este cultivo como BMP es muy recomendable en la zona.

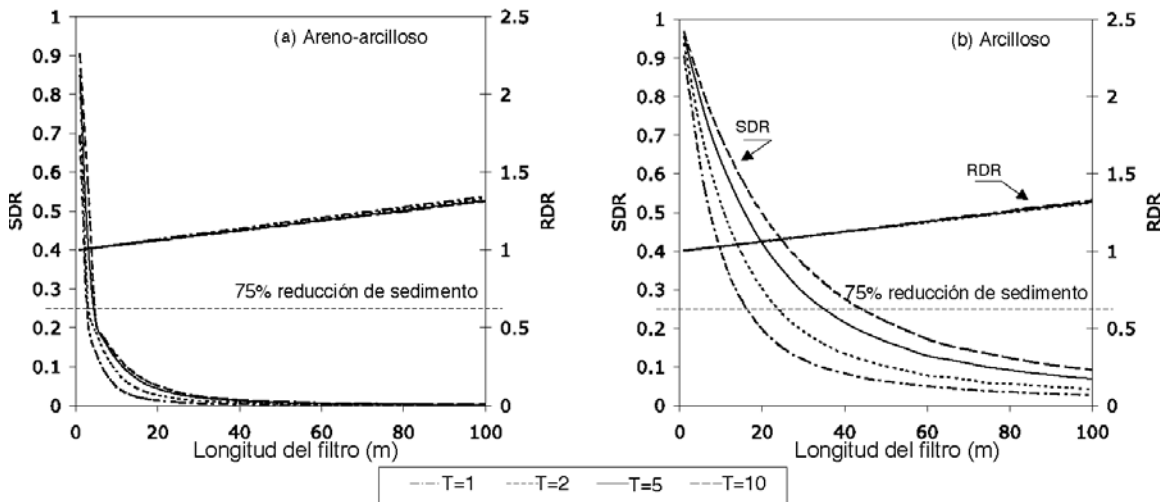
### **Caso 3: Uso de filtros vegetativos de hierba para la reducción del transporte superficial de sedimento y fósforo en escorrentía procedentes de zonas alteradas de minería.**

La erosión del suelo y su transporte por escorrentía continúan siendo uno de las principales fuentes de contaminación de aguas subterráneas en todo el mundo. Productos químicos y organismos patógenos pueden ser también transportados por la escorrentía tanto en disolución como unidos al sedimento. Una de las BMP más comunes para reducir el impacto de la escorrentía es el uso de filtros vegetativos (VFS) rodeando los cuerpos de agua superficial. Los VFS se definen como bandas de vegetación densa que tienen la capacidad de atrapar sedimento y otros contaminantes superficiales mediante filtración, deposición e infiltración (Dillaha et al., 1989). Muchos investigadores han encontrado que estos filtros, si son instalados y mantenidos correctamente, tienen

eficiencias muy altas de reducción de sedimento y otros contaminantes. Sin embargo, como con muchas otras BMPs, no existen criterios objetivos y universalmente aceptados para su diseño (Muñoz-Carpena y Parsons, 2004). El diseño óptimo de estos filtros debe responder a una pregunta básica: ¿cuáles deben ser las características para su construcción en un lugar específico que permitan obtener una reducción del contaminante en escorrentía de acuerdo a la normativa exigida para la zona (p.ej. un TMDL)?. Entre estas características del filtro de cara a su diseño cabe señalar su longitud, anchura, pendiente y vegetación. A su vez el funcionamiento del filtro viene condicionado por el medio: clima, suelo, características de la zona alterada fuente del contaminante (p.ej. cultivo, construcción, minería), sus prácticas de manejo, superficie, etc.

El modelo de ordenador VFSMOD-W (Muñoz-Carpena et al., 1993; Muñoz-Carpena et al., 1999a; Muñoz-Carpena y Parsons, 2004) ha sido desarrollado para responder a estas preguntas con una herramienta objetiva. Este modelo bajo entorno gráfico de MS-Windows combina la solución numérica del flujo de agua en escorrentía e infiltración en el filtro durante un suceso de lluvia, con un modelo de deposición de sedimento en hierba desarrollado en la Universidad de Kentucky. Recientemente Muñoz-Carpena y Parsons (2004) utilizaron el concepto hidrológico de periodo de retorno de la precipitación ( $T$ ) para proponer un procedimiento normalizado de diseño de VFS. Para ello añadieron un módulo de generación automática de entradas del modelo a partir de las características de la zona alterada (pendiente arriba del filtro) basada en la tecnología muy implantada del NCRS (antiguo servicio de Conservación de Suelos de EEUU). VFSMOD-W simula la respuesta del filtro (eficiencia) mediante la generación automática de archivos de entrada y salida basándose en rangos elegidos por el usuario. Este procedimiento se repite para las tormentas máximas de la zona con  $T=1, 2, 5$  y  $10$  años. Como criterio de eficiencia se eligió la relación de aporte de sedimento (SDR) y de escorrentía (RDR) definidos respectivamente como la relación entre la salida y la entrada de sedimento (masa) o de escorrentía (volumen o lámina de agua) en el filtro. Con los resultados de las simulaciones en batería ofrecidos por VFSMOD-W se construyen curvas de respuesta que al intersectar con la reducción del sedimento buscada dan los valores de diseños óptimos para cada caso. En la Figura 6 se incluye un ejemplo de tales curvas obtenidas en una localidad de Carolina del Norte (USA) con dos tipos de suelo (arcilloso y areno-

arcilloso, clasificación USDA). En este caso se busca una reducción del 75% del sedimento arrastrado en escorrentía ( $SDR=0.25$ ). La figura muestra que para el suelo areno-arcilloso bastan filtros  $\geq 3.1-3.6$  m para obtener esas eficiencias frente a las tormentas máximas esperadas de 1 a 10 años, mientras que para el arcilloso es necesario filtros mucho más largos ( $\geq 16-44$  m).



**Figura 6. Curvas de respuesta para el diseño de filtros vegetativos obtenidas con VFSMOD-W (Muñoz-Carpena y Parsons, 2004)**

El condado de Polk, al Sur de Florida contiene algunos de los yacimientos de fosfatos más ricos del mundo. La explotación intensiva de este recurso en minería de cielo abierto trajo consigo la contaminación de parte de esta zona al norte de los Everglades. La Universidad de Florida está estudiando el uso de VFS como una BMP para retener no sólo sedimento transportado en escorrentía desde estas zonas, sino también fósforo. Para ello se instalaron varias parcelas de escorrentía dotadas de medidores de electrónicos de flujo, muestreadores de escorrentía automáticos a la entrada y salida de filtros de varias longitudes, y seguimiento del contenido de humedad y variables climáticas. Los datos están siendo utilizados para el desarrollo de VFSMOD-W mediante la inclusión de un nuevo modulo de transporte superficial de fósforo dentro del marco de diseño existente. Dicha herramienta puede ser adoptada por el departamento de Protección ambiental del Estado de Florida, entidad financiadora del proyecto.



## CONCLUSIONES

La hidrología agrícola es una disciplina madura esencial para la gestión sostenible de dos de nuestros recursos mas frágiles y escasos, el agua y el suelo. La hidrología moderna trata de aspectos no sólo de cantidad sino de calidad del agua, integrando su estudio en cada uno de sus componentes atmosférico, superficial, de la zona-no-saturada y subterráneo. Para ello se basa en herramientas potentes en continuo desarrollo, tanto instrumentales como analíticas y de cálculo. La aplicación de estos métodos presenta un futuro esperanzador para la gestión racional de nuestros recursos a través de programas como el TMDL de EEUU y el desarrollo de buenas prácticas agrícolas (BMP) adaptadas y probadas específicamente en cada zona. Como ilustración se describen varios estudios llevados a cabo por la Universidad de Florida en la zona agrícola subtropical que bordea el frágil y amenazado Parque Nacional de los Everglades, una importante reserva natural. Aplicando avanzadas técnicas instrumentales y numéricas se encontraron interrelaciones entre el uso del terreno y la variación del flujo y la calidad del agua subterránea de la zona, así como los efectos positivos de tres BMP potenciales para la zona (cultivo de cubierta de verano para la reducción de la lixiviación de un herbicida hacia el acuífero superficial, el diseño y uso de filtros de hierba para la reducción del transporte de contaminantes por escorrentía superficial).

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez-Benedí, J y R. Muñoz-Carpena (eds). 2004. *Soil-Water-Solute Process Characterization*. CRC Press LLC:Boca Raton.
- Bosch, D. 2003a. Total Maximum Daily Loads, Part 1: Why is this a ticklish topic? What exactly are TMDLs? *Resource (ASAE)*, 10(1): 10-11.
- Bosch, D. 2003b. Total Maximum Daily Loads, Part 2: Why are they necessary? How will they impact you? *Resource (ASAE)*, 10(3): 11-12.
- Dillaha, T. A., R. B. Reneau, S. Mostaghimi, y D. Lee. 1989. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint-source pollution control. *Trans. ASAE* 32(2): 491-496.
- Muñoz-Carpena, R., J. E. Parsons, y J. W. Gilliam. 1993. Numerical approach to the overland flow process in vegetative filter strips. *Trans. of ASAE* 36(3):761-770.

- Muñoz-Carpena, R., J. E. Parsons, y J. W. Gilliam. 1999a. Modeling overland flow and sediment transport in vegetative filter strips: model development and application. *Journal of Hydrology* 214(1-4):111-129.
- Muñoz-Carpena, R., A. Ritter, y C. Tascón (eds). 1999b. Estudios en la zona no saturada IV Jornadas de la Zona no Saturada. ICIA:La Laguna (España). ISBN: 84-699-1258-5. <http://www.icia.rcanaria.es/zns99/libro.html>
- Muñoz-Carpena, R., D. Bosch, A. Ritter, B. Schaffer y T. Potter. 2002. Modeling Hydrology and Water Quality Associated with Agricultural Best Management Practices in Florida's South Dade Everglades Basin. *ASAE Paper* No. 022128. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Muñoz-Carpena, R. and Y. Li. 2003. Study of the Frog Pond area hydrology and water quality modifications introduced by the C-111 Project detention pond implementation. Project Report No. TREC-RMC-2003-01. Homestead, FL: IFAS-University of Florida. URL: <http://carpena.ifas.ufl.edu/Research/FP2Report/FP2Report.html>
- Muñoz-Carpena, R. y J. Álvarez-Benedí. 2004. Preface. En: J. Alvarez-Benedi y R. Muñoz-Carpena (eds). *Soil-Water-Solute Process Characterization*. pp. v-xii. CRC Press LLC: Boca Raton.
- Muñoz-Carpena, R. y J.E. Parsons. 2004. A design procedure for vegetative filter strips using VFSSMOD-W. *Trans. of ASAE* 47(5):\_\_\_\_-\_\_\_\_.
- Muñoz-Carpena, R. , A. Ritter y Y.C. Li. 2004. Dynamic factor analysis of groundwater quality trends in an agricultural area adjacent to Everglades National Park. *Journal of Contaminant Hydrology* (en revisión).
- Muñoz-Carpena, R., y A. Ritter. 2004. Hidrología Agrícola (en revisión).
- Potter, T.L., D.D. Bosch, H. Joo, B. Schaffer y R. Muñoz-Carpena. 2004a. Demonstration and Evaluation of South Dade Basin Vegetable Crop Best Management Practices: Summer Cover Crops to Control Herbicide and Fertilizer Leaching. Contract Number: C-12331. USDA Agreement Number: 58-6602-1-211. USDA Miscellaneous Publication 1343. USDA-ARS Southeast Watershed Research: Tifton, GA. <http://carpena.ifas.ufl.edu/Research/SunnHempReport.pdf>
- Potter, T.L., D.D. Bosch, H. Joo, B.A. Schaffer and R. Muñoz-Carpena. 2004b. Summer cover crops reduce atrazine and degradates loading of shallow groundwater in Florida's Miami-Dade County. Submitted to *JEQ* (en revisión)
- Ritter, A. y R. Muñoz-Carpena. 2004. Dynamic factor modeling of hydrological patterns in an agricultural area adjacent to Everglades National Park. *J. of Hydrology* (en revisión).