



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA FORESTAL

CUANTIFICACIÓN DE LAS TASAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN
DE SEIS COBERTURAS DEL HUMEDAL PALO VERDE, PARQUE
NACIONAL PALO VERDE, COSTA RICA

CATALINA ESQUIVEL VARGAS

CARTAGO, COSTA RICA

2013

CUANTIFICACIÓN DE LAS TASAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE SEIS COBERTURAS DEL HUMEDAL PALO VERDE, PARQUE NACIONAL PALO VERDE, COSTA RICA

Catalina Esquivel Vargas¹

Resumen

El objetivo de este estudio fue valorar una parte de la hidrología de los espejos de agua del humedal Palo Verde (Parque Nacional Palo Verde). Se cuantificaron las tasas de evapotranspiración de las coberturas *Neptunia natans*, *Thalia geniculata*, *Typha dominguensis* y *Eichhornia crassipes*, además de una mezcla de las especies y el espejo de agua. Las plantas fueron extraídas del humedal y colocadas en lisímetros (25 litros) contruidos a partir de recipientes plásticos; los cuales fueron ubicados en una zona aledaña a la Estación Meteorológica de la Estación Biológica Palo Verde, Organización para Estudios Tropicales. El volumen evaporado diariamente y las variables meteorológicas del sitio fueron colectados para el periodo Diciembre 2012 – Enero 2013. Se empleó un diseño completamente aleatorio y se determinó la evapotranspiración real y de referencia (método Penman-Monteith), así como el área foliar y el coeficiente de cultivo (Kc) para todas las coberturas. Los datos se analizaron por medio de análisis de varianza (ANOVA), análisis de correlación, pruebas de Fisher LSD y diseño de bloques completamente aleatorio (DBCA) dependiendo de las variables involucradas. *Thalia geniculata* (ET: 17.03 mm d⁻¹; Kc: 2.57) y el espejo de agua (ET: 8.23 mm d⁻¹; Kc: 1.24) mostraron el mayor y menor valor de ET diaria y Kc, respectivamente. La mayoría de las coberturas mostraron correlaciones positivas (entre 0.38 y 0.78) con las variables de temperatura del aire, radiación acumulada y velocidad del viento. El ANOVA para la ET diaria y el Kc indicaron que *Eichhornia crassipes* y *Neptunia natans* fueron estadísticamente diferentes, al igual que *T. dominguensis* y la mezcla, mientras que el agua y *T. geniculata* mostraron diferencias significativas con respecto a todas las demás coberturas.

Palabras clave: lisímetros, plantas acuáticas, coeficiente de cultivo, pantanal, Guanacaste

¹Estudiante de la Escuela de Ingeniería Forestal. Tecnológico de Costa Rica
e-mail: cataesquiva@gmail.com

EVAPOTRANSPIRATION RATES QUANTIFICATION OF SIX PLANT COVERS OF PALO VERDE WETLAND, PALO VERDE NATIONAL PARK, COSTA RICA

Abstract

The objective of this study was to evaluate a part of the Palo Verde water bodies hydrology. Evapotranspiration rates quantification were carried out for the plant cover of *Neptunia natans*, *Thalia geniculata*, *Typha dominguensis*, *Eichhornia crassipes*, a mixture of species, and open water conditions. The plants were removed from the wetland and placed in lysimeters (volume) built from plastic containers. The lysimeters were located in an open area near the Meteorological Station of the Palo Verde Biological Station, Organization for Tropical Studies. Evaporated volume and meteorological data were collected for the study period of December 2012 – January 2013. A completely randomized design was applied to determine the real evapotranspiration, reference evapotranspiration (Penman-Monteith method), individual leaf area, and crop coefficient (Kc) for all plant covers. Gathered data was analyzed through the analysis of variance (ANOVA), correlation analysis, Fisher LSD tests, and a randomized complete block design (RCBD). *Thalia geniculata* (ET: 17.03 mm d⁻¹, Kc: 2.57) and open water (ET: 8.23 mm d⁻¹, Kc: 1.24) showed the highest and lower values of daily ET and Kc, respectively. Most of the plant covers showed positive correlations (between 0.38 and 0.78) with the air temperature, net radiation, and wind speed. Daily ET and Kc ANOVA indicated that *Eichhornia crassipes* and *Neptunia natans* were statistically different as well as *T. dominguensis* and the species mixture, while the water and *T. geniculata* showed significant differences with regard to other plant covers.

Key words: lysimeters, aquatic plants, crop coefficient, marshland, Guanacaste

Acreditación

Esta tesis fue aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura

CUANTIFICACIÓN DE LAS TASAS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DE SEIS COBERTURAS DEL HUMEDAL PALO VERDE, PARQUE NACIONAL PALO VERDE, COSTA RICA

Miembros del Tribunal Evaluador

César D. Jiménez Rodríguez, M.Sc.
Director de Tesis

Mahmood Sasa Marín, Ph.D
Director Estación Biológica PV

Braulio Vílchez Alvarado, M.Sc
Escuela de Ingeniería Forestal

Dorian Carvajal Vanegas, Lic
Escuela de Ingeniería Forestal

Catalina Esquivel Vargas
Estudiante

Dedicatoria

A Dios y a mis padres, por su gran apoyo y motivación durante mis 5 años en el Tec y mi periodo de tesis, sin ellos no hubiera llegado hasta aquí

A mis hermanos, Karo y Pablo porque siempre han sido mi inspiración y un ejemplo a seguir

A mi tía Diannette, por compartir su cariño y paciencia durante casi todas las etapas de mi vida

Agradecimientos

A Dios, mis padres y mi familia

A César mi tutor, por toda su dedicación, tiempo, apoyo, preocupación y nunca dejarme sola durante todo mi periodo de tesis

A Mahmood Sasa, por otorgarme la oportunidad de realizar mi trabajo en la OET y compartir sus conocimientos de Palo Verde

A Holcim-Costa Rica S.A, principalmente al Ing. Andrés Villalobos, por brindar el financiamiento para llevar a cabo el proyecto y permitir mi estadía en la Estación

A Sergio, por la motivación de todos los días en la estación en mis momentos de desesperación, su entrega y porque sin su ayuda durante los 2 meses no hubiera logrado llevar a cabo mi trabajo de campo

A todo el personal de la estación de Palo Verde: Salo, Romelio, Oscar, Davy, Pajarín, Gilberto, Juan, doña Maritza, por su carisma, su compañía, ayuda incondicional y hacerme sentir como en familia durante mi estadía

A Jossie, por estar conmigo todos estos años, compartir alegrías, lágrimas, problemas, giras, noches de estudio, apoyarme, darme tranquilidad y regalarme siempre el cariño de mejor amigo

A Sofi, por cuidarme, ser mi compañera, amiga, confidente, compartir miles de momentos y llegar juntas hasta el final; y a Keren, por compartir conmigo una linda amistad, por los trabajos, las traspasadas, las giras, los valiosos consejos y ser una amiga muy especial

A Mari y Alonso, por ser siempre mis amigos del alma, estar ahí para mí apoyándome, escuchándome y viviendo cada momento de mi vida

A Manuel, por haberme dado fuerzas, apoyo, comprensión, y siempre recordarme de lo que era capaz

A Braulio, por su filosofía y porque sus consejos me enseñaron muchas cosas de la vida

A todos los profes, y personal administrativo de la Escuela de Forestal, por ayudarme en mi formación como persona y como profesional

A mis amigos de forestal, Dani, Nelson, Pedro, Andre, Maikol, Kikut, por todos los momentos compartidos y el vínculo de amistad que mantenemos.

Al programa de Manejo y Conservación de Recursos Naturales del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Índice general

Abstract.....	iii
Acreditación.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice general.....	viii
Índice de cuadros.....	ix
Índice de figuras.....	x
Índice de anexos.....	xi
Introducción.....	- 1 -
Metodología.....	- 4 -
Diseño experimental.....	- 6 -
Recolección de datos.....	- 8 -
Resultados.....	- 11 -
Discusión.....	- 17 -
Conclusiones y Recomendaciones.....	- 22 -
Referencias.....	- 23 -
Anexos.....	- 27 -

Índice de cuadros

Cuadro 1. Coeficientes de correlación de la ET diaria promedio de seis coberturas y las variables meteorológicas del estudio en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. - 13 -

Cuadro 2. Valores promedio (\bar{X}) y desviación estándar (S) para el área foliar, la ET diaria, ET acumulada y coeficiente de cultivo (K_c) de seis coberturas evaluadas en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. - 17 -

Índice de figuras

Figura 1. Localización geográfica del sitio de estudio, humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica..... - 4 -

Figura 2. Climadiagrama de la estación meteorológica Palo Verde. El área negra representa la variación de los meses con excedente de precipitación, el área blanca indica la lluvia supliendo los requerimientos de evapotranspiración, el área con líneas verticales representa los meses con déficit hídrico; delimitado por la evapotranspiración potencial (línea punteada) y temperatura (línea continua) (Datos: periodo 2008-2012). - 6 -

Figura 3. Unidades experimentales seleccionadas en el presente estudio dentro del Parque Nacional Palo Verde. A) *Neptunia natans*; B) *Thalia geniculata*; C) *Eichhornia crassipes*; D) Mezcla de especies; E) *Typha domingensis*; F) Espejo de agua. - 7 -

Figura 4. Esquema previo del ensayo (A) y distribución en campo (B) del estudio en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica..... - 8 -

Figura 5. Condiciones meteorológicas del sitio de estudio durante 40 días de medición en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica..... - 11 -

Figura 6. Evapotranspiración promedio diaria y evapotranspiración acumulada de seis coberturas del humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. Periodo de muestreo: 40 días..... - 13 -

Figura 7. Temperatura promedio y desviación estándar en tres momentos del día de seis coberturas del humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica..... - 14 -

Figura 8. Etapas del coeficiente de cultivo basadas en el esquema de Allen et al (2006) y adaptadas al estudio en el humedal Palo Verde Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. La línea naranja indica la etapa en que se desarrolló la investigación. - 16 -

Índice de anexos

Anexo 1. Porcentaje de incidencia de las especies vegetales presentes en los espejos de agua del humedal Palo Verde, Costa Rica. Porcentaje de incidencia relacionado a 348 unidades muestrales distribuidas en 6 parcelas de 400 m²..... - 27 -

Anexo 2. Evapotranspiración real (ET) y evapotranspiración de referencia (Eto) calculada con Penman-Monteith, para las seis coberturas, durante 40 días de medición, del estudio en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica..... - 28 -

Anexo 3. Matriz de correlaciones de la evapotranspiración con las variables meteorológicas, área foliar y temperatura de los lisímetros, del humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica..... - 29 -

Introducción

La existencia de los humedales está determinada directamente por un equilibrio en la disponibilidad de agua, la cual se da a causa de la capacidad del movimiento de los cuerpos de agua por encima y por debajo del suelo; en combinación con condiciones ambientales que benefician la evapotranspiración (Rojas *et al* 2003). La Convención RAMSAR (UNESCO 1971) define a los humedales como “extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja, no exceda de seis metros”

Estos ecosistemas albergan un gran número de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados; de tal manera que las poblaciones en los humedales pueden ascender a miles de individuos (McCoy 1996). En Centroamérica, los humedales proveen una zona de refugio para las aves acuáticas (Halls 1997), brindando servicios esenciales a los ecosistemas como el mantenimiento de la calidad de agua (Ellison 2004). A nivel de Centroamérica existen una serie de humedales considerados de importancia internacional o sitios RAMSAR, dentro de los cuales se pueden destacar Crooked Tree Lagoon en Belice, Laguna El Jocotal en El Salvador; Laguna del Tigre y Punta de Manabique en Guatemala, Parque Nacional Jeanette Kawas y Humedales de la Zona Sur de Honduras en Honduras, Los Guatuzos y Refugio de Vida Silvestre Río San Juan en Nicaragua, Caño Negro y Parque Nacional Palo Verde en Costa Rica (UICN 2002).

En Costa Rica, el Parque Nacional Palo Verde (PNPV) cuenta con una extensión de 19 000 hectáreas en total, de las cuales unas 9500 corresponden a humedales, caracterizados por su estacionalidad, lo que condiciona la presencia de vegetación así como de aves acuáticas (Crow 2002; Hernández y Gómez 1993). En estos humedales se han reportado bandadas de 25 000 piches (*Dendrocygna autumnalis*), 15 000 cercetas aliazules (*Anas discors*) y 700 individuos de la espátula rosada (*Platalea ajaja*) haciendo uso del espejo de agua y la vegetación circundante. Asimismo, el jabirú (*Jabiru mycteria*) (ave considerada en peligro de extinción) anida y se alimenta en el PNPV y lagunas cercanas a este (Vaughan *et al.* 1994). Se han contabilizado hasta 116 taxones de macroinvertebrados acuáticos pertenecientes a 47 familias, distribuidas en 18 órdenes (Trama *et al* 2009). Además, se encuentran presentes unas

100 especies de plantas acuáticas, lo cual representa un 31% del total presente en los humedales de Costa Rica. Sin embargo, a pesar de que existe un claro conocimiento sobre la importancia de estas tierras pantanosas para las aves y otros animales, no se ha prestado la atención debida a las plantas acuáticas de las cuales estos organismos dependen para su supervivencia (Crow 2002).

Las plantas acuáticas despiertan un gran interés biológico debido al importante papel que juegan en estos ecosistemas. Las especies vegetales de los humedales no sólo funcionan como hábitat para comunidades de crustáceos (cangrejos), insectos y gusanos de vida acuática; sino que también intervienen en la alimentación, el refugio de peces y aves; siendo utilizadas en otros países para depurar suelos y aguas contaminadas (Santana 2007). Además, desempeñan otra serie de funciones como son la oxigenación del ambiente acuático por medio de las especies sumergidas (como *Najas guadalupensis* y *Najas arguta*, presentes en el PNPV), las cuales intervienen en el movimiento y almacenaje de agua, constituyen el paisaje ecológico de los humedales y son los productores primarios, en conjunto con las macro-algas y el fitoplancton (Lot y Novelo 2004).

En los últimos años, la ecología del Humedal Palo Verde se ha visto alterada por el cambio en los afluentes de agua producto de diques, carreteras, canales de riego para cultivos de azúcar, arroz y melón; así como el aumento de nutrientes producto de los agroquímicos utilizados en estas actividades agrícolas (Arce 2005). Añadido a esto, algunos investigadores afirman que la falta del manejo por pastoreo con ganado (el cual se retiró del sitio una vez que se convirtió en área protegida) y cambios en el régimen hidrológico del humedal (debido a una secuencia de años muy secos), originó que la calidad de los ecosistemas disminuyera drásticamente. Estas condiciones favorecieron que la tifa (*Typha domingensis*) invadiera la laguna estacional, cubriendo el espejo de agua que utilizan las aves para alimentarse (Calvo y Arias 2004; Vaughan *et al* 1994).

Debido a esta problemática, las entidades involucradas en el manejo, protección y control del PNPV elaboraron el plan de recuperación del humedal, el cual incluye entre otras acciones: la restauración hidrológica, el control de la tifa por medio del pastoreo de ganado y del fanguero. De estas actividades, el fanguero implica el paso repetido de un tractor agrícola con ruedas metálicas, con el fin de desintegrar los tallos de la vegetación emergente del humedal y dejar espacios abiertos en el mismo (Ávalos 2004; González y Bufford 2012).

Estas labores de manejo y restauración han favorecido el restablecimiento de especies vegetales como *Thalia geniculata*, *Neptunia natans*, *Nymphaea pulchella*, *Eichhornia crassipes* y *Salvinia minima* en los espejos de agua, aumentando la cobertura estacional de los mismos. No obstante, la interacción de estas especies con el ambiente biofísico de la laguna crea un nuevo déficit de información relacionado con los procesos fisiológicos de las plantas y su efecto sobre la dinámica hidrológica de la laguna Palo Verde. Por esta razón, se han llevado a cabo esfuerzos para comprender la evapotranspiración (ET) de los humedales, debido a las marcadas diferencias en ET entre los mismos y las variadas metodologías de medición de ET. Goulden *et al* (2006) han analizado los factores que controlan la evapotranspiración de la tifa en pantanos, y muestra la importancia de las estimaciones de comprender la evapotranspiración en humedales.

La ET es uno de los componentes más importantes del ciclo hidrológico, y se define como la pérdida combinada de agua a la atmósfera de las superficies húmedas y la vegetación (Mao *et al* 2002). Este proceso es fundamental en las plantas, por lo cual se debe resaltar el aporte de instrumentos como los lisímetros para su estimación (Allen 1990; citado por Tuñón *et al* 1999).

La evapotranspiración de las plantas acuáticas es un aspecto importante de la hidrología de humedales, la cual está directamente relacionada con las condiciones meteorológicas de cada sitio (Snyder y Boyd 1987). Esta relación ha sido descrita en la ecuación Penman-Monteith para el cálculo de la evapotranspiración potencial o de referencia (E_{to}), referida a la demanda de evapotranspiración de la atmósfera, independientemente del tipo y desarrollo de un cultivo y de las prácticas de manejo (Allen *et al* 2006). Esta ecuación logra incorporar parámetros físicos, fisiológicos y aerodinámicos para determinar la E_{to} de cualquier localidad geográfica y en condiciones climáticas variadas.

De esta forma, la evapotranspiración real y la evapotranspiración de referencia se pueden relacionar mediante un coeficiente de cultivo (K_c). Este coeficiente además de facilitar las labores de riego agrícolas, podría ser utilizado en modelos hidrológicos para relacionar las pérdidas por ET de coberturas específicas de forma general, con base en datos meteorológicos de un sitio y la pérdida de agua calculada para una determinada especie.

El presente estudio tiene como objetivo valorar una parte de la hidrología de los espejos de agua del humedal Palo Verde mediante la cuantificación de la evapotranspiración de seis coberturas *Neptunia natans*, *Thalia geniculata*, *Typha domingensis* y *Eichhornia crassipes*, además de una mezcla de las especies y espejo de agua.

Metodología

Sitio de estudio: El estudio se llevó a cabo en el humedal estacional Palo Verde, localizado dentro del Parque Nacional Palo Verde ($10^{\circ}20'35''N$, $85^{\circ}20'26''W$) (Trama *et al* 2009). El Parque pertenece al Área de Conservación Arenal-Tempisque (ACA-T) y se encuentra situado a unos 20 km al norte de la desembocadura Río Tempisque en el noroeste de la provincia Guanacaste (Figura 1). Su importancia se origina en la unión de una gran ciénaga estacional entre el Río Tempisque y colinas calizas, y entre los últimos remanentes de bosque seco que existen en Mesoamérica (Hartshorn 1983).

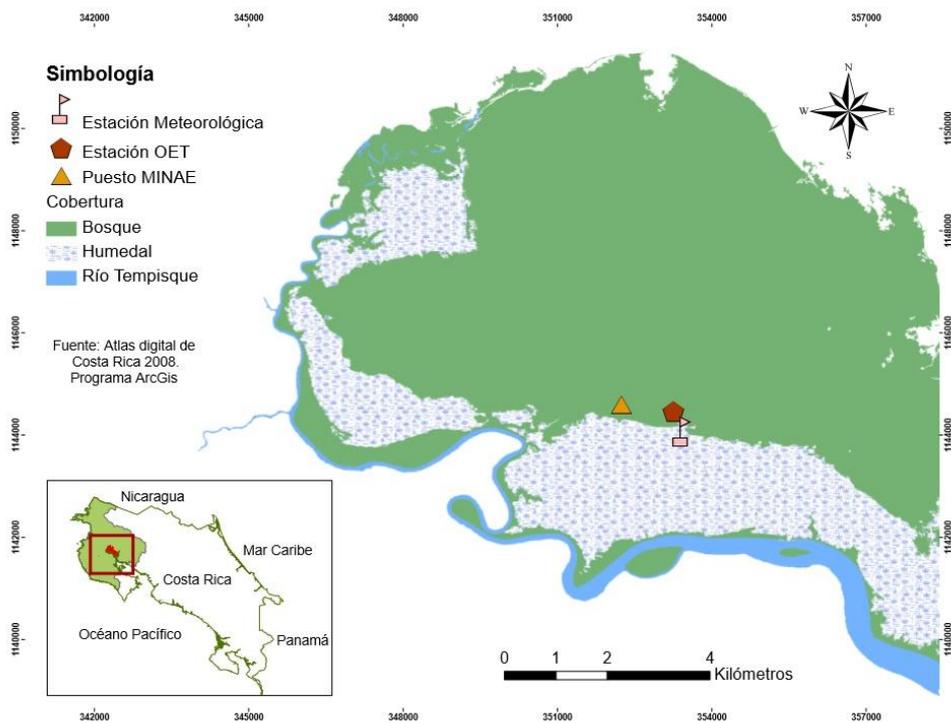


Figura 1. Localización geográfica del sitio de estudio, humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

De acuerdo con el sistema de Zonas de Vida de Holdridge (Holdridge 1967), en el sitio predominan dos zonas de vida: Bosque Húmedo Premontano transición Basal (BhP-B, biotemperatura: 18-24°C y precipitación 2000-4000 mm) y Bosque Húmedo Tropical transición a Seco (BhT-S, biotemperatura: 24-30°C y precipitación: 2000-4000 mm) (Ortiz 2008). Los datos climáticos colectados en el periodo 2008-2012 indican una temperatura promedio anual de 26.6°C, con variaciones entre 25.9 y 27.3°C dependiendo de la época del año. La precipitación media anual es de 1746.6 mm a⁻¹, siendo el periodo entre mayo y noviembre los meses con excedente de precipitación y de diciembre a abril el periodo con déficit hídrico (Figura 2). Además, se ha obtenido una evapotranspiración potencial promedio de 1661.8 mm a⁻¹ (Estación Meteorológica Palo Verde).

La estación lluviosa se extiende de mayo a noviembre y la estación seca en los meses restantes, periodo en el cual los suelos comienzan a agrietarse (Hernández y Gómez 1993). La vegetación acuática se caracteriza por el predominio de plantas emergentes, vegetación flotante como *Ceratopteris pteridoides* y *Salvinia auriculata* y algunas especies sumergidas como *Najas guadalupensis*. Dentro de las plantas emergentes importantes se encuentran *Thalia geniculata*, *Canna glauca*, *Typha domingensis*. También son importantes algunas especies de hierbas como *Paspalum repens*, mientras que en algunas áreas de charcas se forman parches de *Neptunia natans* (Crow 2002).

Existen vientos durante todo el año, pero son más fuertes entre los meses de noviembre y abril, con una dirección predominante del noreste. Los suelos presentes en el área son Entisoles, que además de estar inundados periódicamente se encuentran en condiciones de extrema acidez. El área presenta dos unidades geomorfológicas: la planicie con pendientes entre 0-5%, además de una inclinación hacia el cauce del Río Tempisque; y las serranías de poca elevación compuestas por antiguos arrecifes y cerros testigo del complejo de Nicoya, ambas con ausencia de un sistema de drenajes bien desarrollado (Vaughan *et al* 1994). El patrón de drenaje meándrico del Río Tempisque permite la formación de las llanuras aluviales, así como de los lagos y zonas pantanosas que lo circundan (Badilla 1988). Asimismo, este patrón de flujo fomenta la erosión, la subvaloración de los bancos en el exterior de las curvas y la deposición. Los cambios en un río meándrico, llevan a la alteración del curso del agua y estos cambios crean distintas secuencias de sedimentos en diferentes partes del sistema fluvial (Huggett 2007; Summerfield 1991).

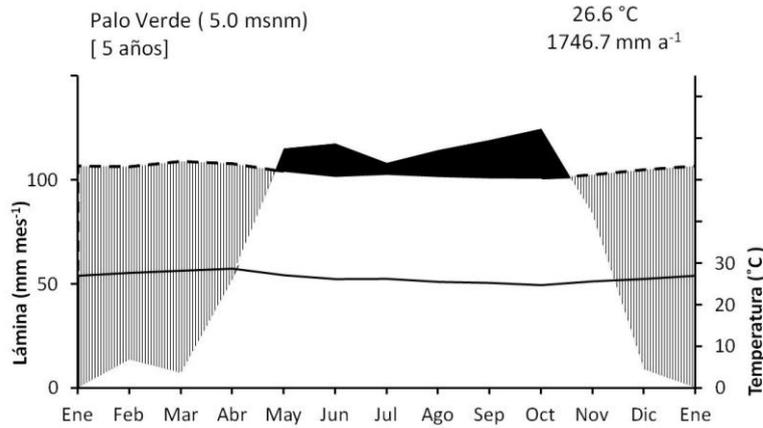


Figura 2. Climadiagrama de la estación meteorológica Palo Verde. El área negra representa la variación de los meses con excedente de precipitación, el área blanca indica la lluvia supliendo los requerimientos de evapotranspiración, el área con líneas verticales representa los meses con déficit hídrico; delimitado por la evapotranspiración potencial (línea punteada) y temperatura (línea continua) (Datos: periodo 2008-2012).

Diseño experimental: Se seleccionaron las especies *Neptunia natans* (*Nep.nat*), *Thalia geniculata* (*Tha. gen.*), *Typha dominguensis* (*Typ.dom.*) y *Eichhornia crassipes* (*Eic. cra.*). Las mismas fueron extraídas del humedal y colocadas en lisímetros con los requerimientos necesarios de agua y sustrato para cada planta. La elección de especies se realizó con base en un estudio preliminar donde se encontró que *Neptunia natans* era de las más abundantes en el humedal (Anexo 1), y por medio de visitas previas a la investigación se logró comprobar la presencia de las demás especies cubriendo el espejo de agua.

Se utilizaron seis unidades experimentales, de las cuales cuatro representaron a las especies seleccionadas, una a la mezcla de las cuatro especies, y la última unidad correspondió al espejo de agua (Figura 3). Cada unidad experimental contó con 5 repeticiones, conformadas por plantas de las coberturas seleccionadas. Plantas adultas de *Neptunia natans*, *Thalia geniculata* y *Eichhornia crassipes* fueron colectadas para su utilización en los lisímetros. En el caso de *Typha dominguensis* se emplearon plantas jóvenes debido a que el estudio se enfocó en las áreas de espejos de agua donde se realiza manejo del humedal, en donde esta especie se encuentra en un estado juvenil de crecimiento.

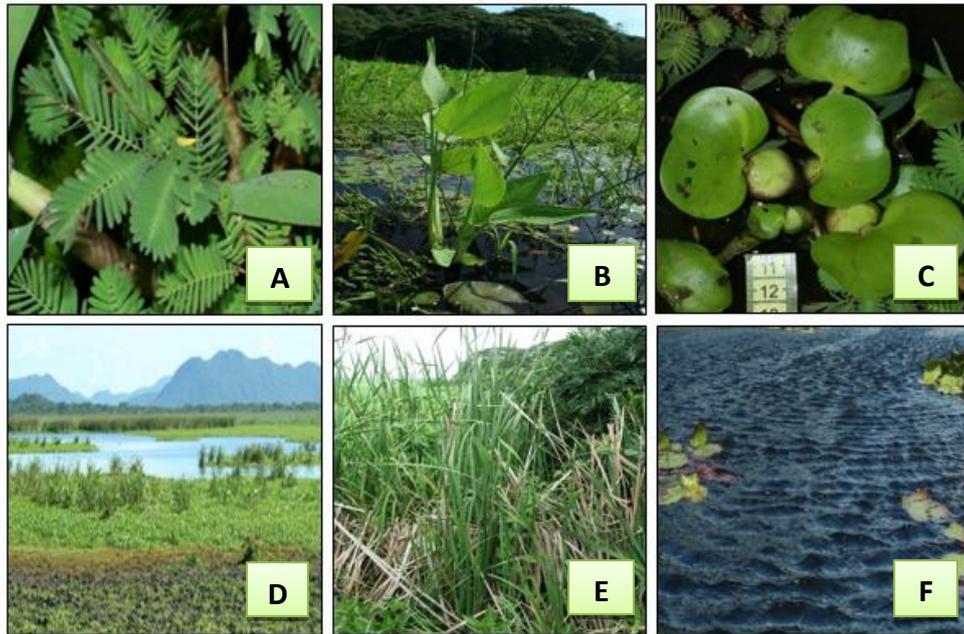


Figura 3. Unidades experimentales seleccionadas en el presente estudio dentro del Parque Nacional Palo Verde. A) *Neptunia natans*; B) *Thalia geniculata*; C) *Eichhornia crassipes*; D) Mezcla de especies; E) *Typha domingensis*; F) Espejo de agua.

Las tasas diarias de ET fueron cuantificadas mediante el método de lisímetros, debido a que es el único método que permite usar una técnica consistente en todas las diferentes formas de plantas, suelo, agua y sustrato, además es fácil de replicar y permite mediciones de ET de plantas completas (Pauliukonis y Schneider 2001; Moors 2008). Los lisímetros empleados fueron recipientes plásticos oscuros de 38 litros de capacidad (52.4 x 35.9 x 31.4 cm), cada uno contenía suelo no disturbado de la laguna representando los primeros 5 cm de sustrato y 25 cm del agua de la laguna. En la parte lateral de cada contenedor, se colocó un vertedero (diámetro: 2 cm) para evacuar el exceso de agua de lluvia, en caso de que hubiera precipitación. Este contenedor instalado manteniendo un margen de 3 cm desde el borde del lisímetro. Los lisímetros fueron distribuidos aleatoriamente dentro de un esquema previamente elaborado (Figura 4). El ensayo de ET se ubicó en una zona aledaña a la Estación Meteorológica de la Organización para Estudios Tropicales (OET).

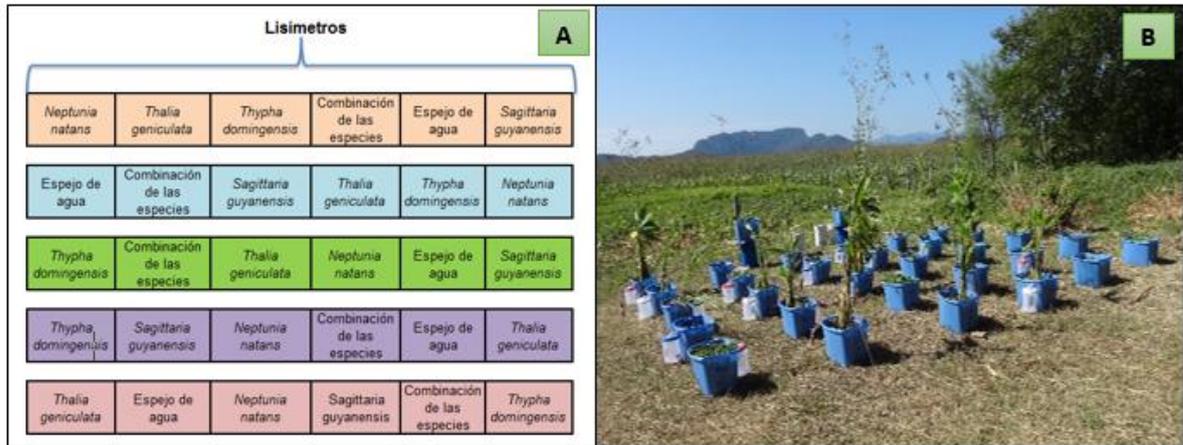


Figura 4. Esquema previo del ensayo (A) y distribución en campo (B) del estudio en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

Recolección de datos

Para determinar el número de plantas por lisímetro, se realizaron 35 conteos de individuos para cada especie en distintos lugares de la laguna. Este conteo se basó en un cuadro con tubos PVC que tiene la misma área de los lisímetros.

Las mediciones se realizaron diariamente durante un período de 45 días consecutivos. Cada medición consistía en agregar por medio de una probeta de 1000 ml, el agua evaporada hasta llegar a la línea base establecida en cada lisímetro. Adicionalmente, se midió la temperatura del humedal y la de los lisímetros de forma aleatoria, seleccionando un lisímetro por cobertura. Estas mediciones de temperatura se realizaron a las 8:30, 13:00 y 17:00 horas.

Los factores meteorológicos empleados en este estudio fueron obtenidos de la Estación Meteorológica de la OET. Las variables de interés corresponden a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), precipitación (mm d^{-1}), velocidad (m s^{-1}) y dirección del viento ($^{\circ}$ de acimut), presión atmosférica (mbar) y radiación solar (W m^{-2}).

Evapotranspiración real (ET): Para el cálculo de la evapotranspiración real, se midió inicialmente el volumen de agua evaporado, y posteriormente se determinó la lámina por medio del área del lisímetro, además se utilizó la precipitación promedio de la estación meteorológica de la OET. La ETR fue estimada con la siguiente ecuación:

$$ET = P - \left(\left(\frac{Q}{A} \right) + \left(\frac{Ve}{A} \right) \right) * 10$$

(Ecuación 1)

Donde ET es la evapotranspiración (mm d⁻¹), P es la precipitación (mm d⁻¹), Q: es el excedente de agua (ml o cm³), Ve es el volumen evaporado (ml o cm³) y A es el área del lisímetro (cm²).

Evapotranspiración de referencia (ET_o): Para calcular la Evapotranspiración de referencia (Ecuación 1), se utilizó la fórmula de Penman-Monteith propuesta por la FAO (Allen *et al* 2006). Para ello, se trabajó con la información meteorológica registrada por la estación meteorológica de la Estación Biológica Palo Verde (OET).

$$ET_o = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

(Ecuación 2)

Donde ET es la evapotranspiración (mm d⁻¹), P es la precipitación (mm d⁻¹), Q: es el excedente de agua (ml o cm³), Ve es el volumen evaporado (ml o cm³) y A es el área del lisímetro (cm²).

Área foliar: Se extrajeron 30 plantas de *Neptunia natans* y 40 plantas de *Thalia geniculata*, *Typha domingensis* y *Eichhornia crassipes*, con la finalidad de medir el área foliar promedio de cada especie. Las hojas fueron escaneadas y las imágenes digitales obtenidas (formato.jpeg) se procesaron con el programa de análisis ImageJ 1.46r (Wayne Rasband; National Institutes of Health). A partir de los datos obtenidos, se calculó un promedio de área foliar (cm²) para cada una de las especies.

Coefficiente de cultivo (K_c): Se utilizó la relación entre la evapotranspiración real (ET) y de referencia (ET_o) para calcular el Coeficiente de Cultivo (K_c) como lo propone Allen *et al* (2006), mediante la ecuación 3:

$$K_c = \frac{ET}{ET_o}$$

(Ecuación 3)

Análisis estadístico: Con el fin de lograr la estabilización de las plantas en los lisímetros y evitar datos “outliers”, los primeros cinco días de medición fueron omitidos, para garantizar que la información colectada correspondiera a plantas establecidas y sin estrés por la reubicación en el lisímetro. Se realizó una matriz de correlaciones con el fin de conocer si se presentaba una alta correlación entre la ET y algunas de las variables hidrometeorológicas. Las variables que se incorporaron fueron: la evapotranspiración real, el área foliar y la temperatura de los lisímetros; así como los factores meteorológicos diarios de temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, radiación neta y presión atmosférica. Además, se llevó a cabo un análisis de correlación de cada una de las coberturas con las variables meteorológicas. Para determinar si existían diferencias entre las seis coberturas se aplicó un análisis de varianza de un factor (ANOVA). Este ANOVA se basó en un diseño completamente aleatorio; donde la ETR diaria, ETR acumulada y el K_c fueron evaluados independientemente y en aquellos casos donde se presentaran diferencias significativas, se les aplicó una prueba de Fisher LSD. También, se elaboró un diseño de bloques completamente aleatorio (DBCA) para la temperatura, basado en tres bloques (los tres momentos del día en que se tomó la temperatura) y 7 tratamientos (las seis coberturas y el humedal). Los supuestos de normalidad fueron aplicados a los residuales. Todas las pruebas estadísticas se realizaron mediante el programa STATISTICA 7.0 (Stat Soft Inc. 2004), considerando un α de 0.05.

Resultados

Condiciones meteorológicas

La figura 5 muestra las variaciones que mostraron los factores meteorológicos a lo largo del período de estudio. Se obtuvo una temperatura promedio del aire de $27.62 (\pm 0.74) ^\circ\text{C}$, presentándose dos picos muy marcados de 26°C en la temperatura al finalizar el mes de diciembre (día 24) y enero (día 18), y un valor elevado cerca de la mitad de enero. La precipitación estuvo prácticamente ausente durante todo el periodo, con excepción de un evento de 1.27 mm d^{-1} el 27 de diciembre del 2012.

La humedad relativa exhibió una tendencia relativamente constante, con pocas variaciones durante el tiempo de medición y un promedio de $56.71 (\pm 5.06) \%$ (Figura 5). La velocidad promedio del viento fue de $2.96 (\pm 0.68) \text{ m s}^{-1}$, presentando dos picos muy evidentes (1.31 y 0.93 ms^{-1}) durante el mes de diciembre, y para finales de enero manifestó una tendencia a aumentar su velocidad. Por otra parte, la presión atmosférica mostró un valor promedio de $1009.50 (\pm 1.23) \text{ mbar}$ a lo largo de los 40 días de medición. Estos datos fueron utilizados para calcular la ETo diaria (Anexo 2).

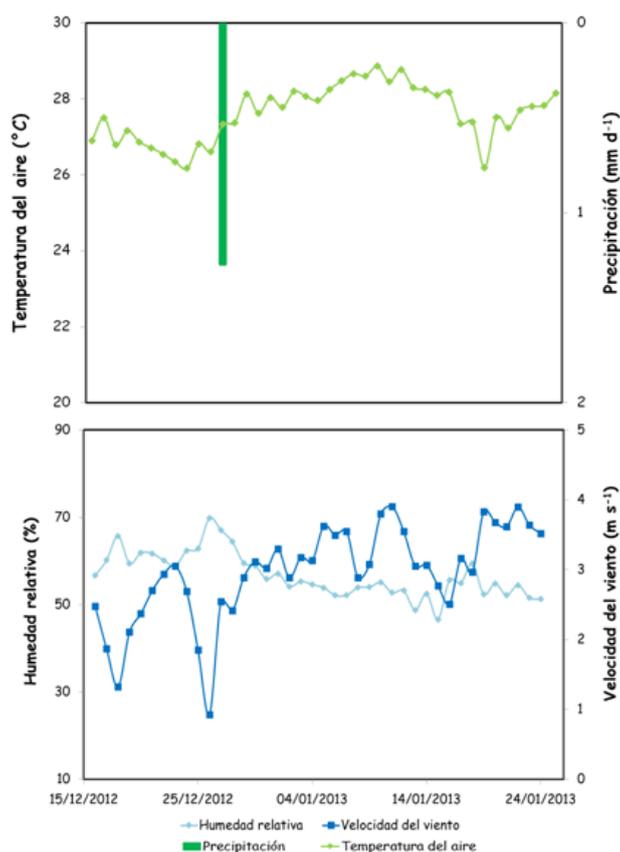


Figura 5. Condiciones meteorológicas del sitio de estudio durante 40 días de medición en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

Evapotranspiración

La figura 6 muestra una variación temporal de la ET para las coberturas evaluadas. *T. geniculata* presentó los valores más altos de ET (17.03 mmd^{-1}) y una disminución en los últimos días de enero. *T. dominguensis* muestra un comportamiento contrario, pues la ET se comienza a intensificar al finalizar el mes de enero. El espejo de agua mostró los valores más bajos en promedio ($8.23 \pm 1.56 \text{ mm d}^{-1}$), mientras que las tres coberturas restantes presentaron una fluctuación de ET sin tendencias a aumentar o disminuir a lo largo del tiempo. Es importante resaltar que a pesar de que *T. geniculata* obtuviera los mayores valores, *T. dominguensis* aumenta su ET cuando el humedal se está secando y disminuye la presencia de espejos de agua. Es posible observar que la ET en las seis coberturas demuestra una tendencia a incrementar en el transcurso de todo el estudio, como efecto de la entrada de la época seca. La cobertura *T. geniculata* se mantiene con el mayor valor de ET acumulada, mientras que el espejo de agua presenta el menor valor. Por otra parte, las coberturas *T. dominguensis* y mezcla presentan una tendencia similar entre sí, al igual que *E. crassipes* y *N. natans*.

El análisis de correlación realizado para la ET de cada una de las coberturas con las variables meteorológicas muestra que la mayoría de las coberturas presentan correlaciones entre 0.38 y 0.78 con las variables de temperatura del aire, radiación acumulada y velocidad del viento (Cuadro 1). La humedad relativa presentó una correlación alta pero inversamente proporcional con la ETR en la mayoría de los casos, mientras que la presión atmosférica mostró valores bajos de correlación para todas las coberturas evaluadas. La importancia de analizar cada una de las coberturas de forma independiente, es que cada una puede presentar un comportamiento distinto en cuanto al efecto de los factores meteorológicos en la pérdida de agua por evapotranspiración.

La matriz mostró valores bajos de correlación de la ETR con respecto a las variables meteorológicas evaluadas. (Anexo 3), donde la ETR se correlaciona positivamente con la velocidad del viento, la radiación acumulada y la temperatura del aire, con valores de 0.24, 0.34 y 0.24, respectivamente.

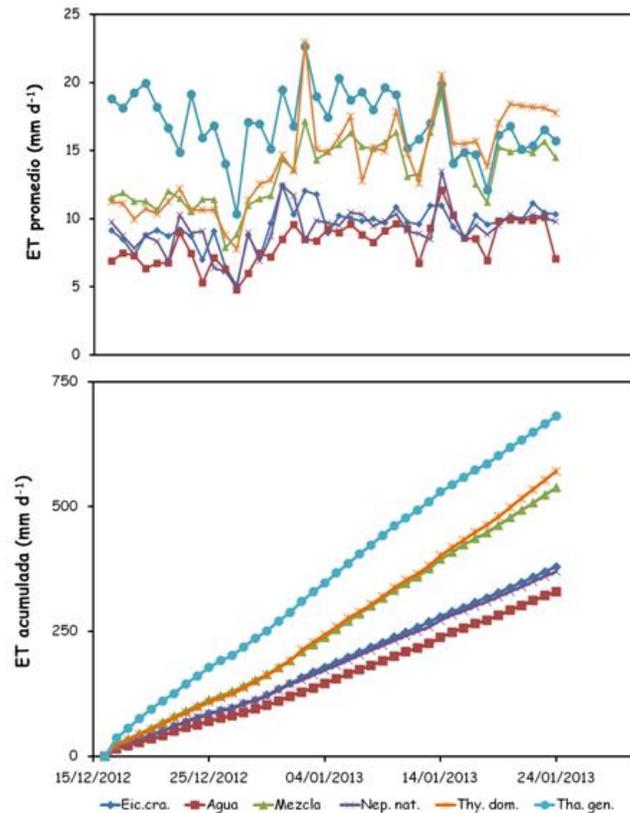


Figura 6. Evapotranspiración promedio diaria y evapotranspiración acumulada de seis coberturas del humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. Periodo de muestreo: 40 días.

Cuadro 1. Coeficientes de correlación de la ET diaria promedio de seis coberturas y las variables meteorológicas del estudio en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

Cobertura	Variable Meteorológica				
	Temp. del aire	Rad. acum.	Hum. rel.	Vel. del viento	Presión atm
<i>Eic. cra</i>	0.50	0.62	-0.70	0.59	0.26
Agua	0.53	0.61	-0.75	0.58	0.17
Mezcla	0.70	0.73	-0.83	0.63	0.11
<i>Nep. nat.</i>	0.38	0.60	-0.63	0.54	0.24
<i>Tha. gen.</i>	0.31	0.41	-0.21	0.01	-0.18
<i>Typ. dom.</i>	0.56	0.62	-0.77	0.65	0.28

En la figura 7, la variación de la temperatura a lo largo del día mostró diferencias con respecto a las coberturas y al humedal. Principalmente a las 13:00 horas, donde el pico de radiación es máximo, se observó que la temperatura tomada en el humedal es considerablemente menor (hasta 3°C) que la de las coberturas, mientras que a las 8:30 y 17:00 horas los valores son similares entre coberturas y el humedal.

El análisis estadístico indicó diferencias significativas entre la temperatura del humedal y las coberturas ($g.l=1;6;2$, $\alpha=0.05$, $F_{coberturas}= 31.6$, $p_{coberturas}<0.0001$, $F_{horas}= 2446.6$, $p_{horas}=0.0001$). El humedal resultó estadísticamente diferente a todas las coberturas evaluadas, de igual forma que *T. geniculata*, el espejo de agua y *N. natans* no mostraron diferencias significativas en las medias de la temperatura con *T. dominguensis* ni *E. crassipes*. Por otra parte, la mezcla de especies y *T. dominguensis* tampoco indicaron diferencias estadísticas entre sí. Con base en estos resultados se debe tomar en cuenta algunos aspectos relevantes: a) debido a que las plantas estaban contenidas en lisímetros, el volumen de agua dentro de los mismos era mucho menor; b) las coberturas al encontrarse fuera de su ambiente natural, los factores climáticos y ambientales influyen de una forma más directa en la misma y como consecuencia la temperatura puede resultar mayor que en la laguna.

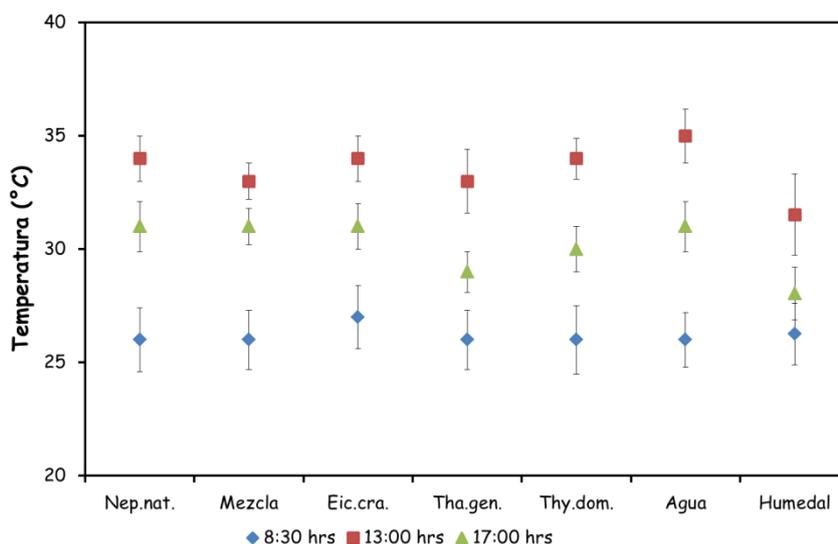


Figura 7. Temperatura promedio y desviación estándar en tres momentos del día de seis coberturas del humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

Coeficiente de cultivo (Kc)

Allen *et al* (2006) establece que el coeficiente de cultivo se divide en cuatro etapas dependiendo del estado de desarrollo en que se encuentren las plantas: 1) la etapa inicial comprendida entre la fecha de siembra y el momento en que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo; 2) la etapa de desarrollo del cultivo comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa; 3) la etapa de mediados de temporada, la cual comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez; 4) la etapa final o tardía de crecimiento que comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia.

De esta manera, adaptando dicho esquema al presente estudio, se consideran tres fases según la estacionalidad del humedal: 1) cuando está iniciando la época lluviosa y la laguna se está cubriendo de agua; 2) cuando la laguna está en el punto máximo y se encuentra completamente cubierta de agua; 3) al comienzo de la época seca cuando la mayoría de las plantas anuales en el humedal están terminando su ciclo de vida. Por lo tanto, es fundamental resaltar que el presente estudio determinó el Kc para esta última etapa del humedal (Kc final), como se muestra en la Figura 8. Los valores promedio obtenidos de Kc para cada cobertura en estudio aparecen en el cuadro 2. *T. geniculata* mostró el mayor coeficiente de cultivo, seguida de *T. dominguensis*, mientras que los valores más bajos corresponden a *E. crassipes* y el agua, coincidiendo de esta forma, con la tendencia de los demás resultados expuestos anteriormente.

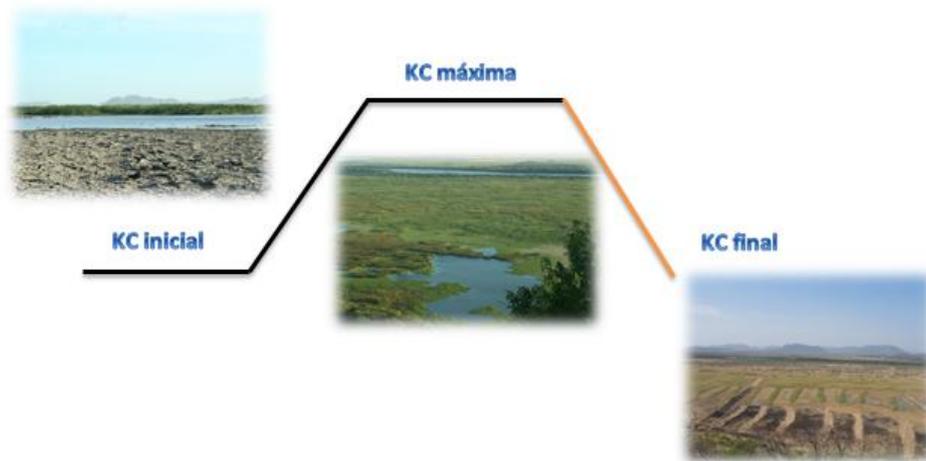


Figura 8. Etapas del coeficiente de cultivo basadas en el esquema de Allen et al (2006) y adaptadas al estudio en el humedal Palo Verde Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica. La línea naranja indica la etapa en que se desarrolló la investigación.

El cuadro 2 muestra el área foliar promedio, ET diaria promedio, ET acumulada y coeficiente de cultivo (Kc), para cada una de las coberturas evaluadas. En general, cada cobertura presentó un promedio de área foliar variable, siendo *T. geniculata* y *T. dominguensis* las de mayor y menor valor, respectivamente.

El análisis de varianza aplicado para la ET diaria ($g.l=1;5$, $\alpha=0.05$, $F=96.22$, $p=0.0000$) y el Kc ($g.l=1;5$, $\alpha=0.05$, $F=119.96$, $p<0.0001$) indican la misma tendencia en cada cobertura, donde *E. crassipes* y *N. natans* no mostraron diferencias estadísticas significativas, al igual que *T. dominguensis* y la mezcla de especies. Mientras que el agua y *T. geniculata* fueron significativamente distintas a todas las demás coberturas. Asimismo, la ET acumulada ($g.l=1;5$, $\alpha=0.05$, $F=56.47$, $p<0.0001$) también mostró diferencias significativas entre coberturas. *E. crassipes*, *N. natans* y el espejo de agua fueron estadísticamente iguales. El mismo patrón mencionado anteriormente, lo mostraron la mezcla de especies y *T. dominguensis*. Mientras que la cobertura *T. geniculata* resultó estadísticamente diferente a las restantes (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores promedio (\bar{X}) y desviación estándar (S) para el área foliar, la ET diaria, ET acumulada y coeficiente de cultivo (Kc) de seis coberturas evaluadas en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

Cobertura	Área foliar (cm ²)	ET (mm d ⁻¹)		ET acum. (mm)*		Kc (ET/ET _o) promedio	
		\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S
Espejo de Agua	-	8.23 ^a	1.56	329.20 ^a	27.74	1.24 ^a	0.21
<i>Nep. nat.</i>	11.76	9.25 ^b	1.59	369.84 ^a	18.84	1.40 ^b	0.23
<i>Eic. cra.</i>	61.09	9.49 ^b	1.47	379.63 ^a	14.82	1.44 ^b	0.21
Mezcla	70.35	13.45 ^c	2.41	537.81 ^b	20.25	2.03 ^c	0.31
<i>Thy. dom.</i>	55.63	14.27 ^c	3.39	570.59 ^b	66.26	2.15 ^c	0.47
<i>Tha. gen.</i>	152.92	17.03 ^d	2.4	681.04 ^c	64.43	2.57 ^d	0.32

*Periodo de 40 días consecutivos; valores con letras diferentes (a,b,c,d) en la misma columna, indican diferencias significativas entre coberturas, comparaciones realizadas con la prueba de Fisher LSD (alpha=0.05)

Discusión

Las diferencias en la pérdida de agua diaria y acumulada de las coberturas en estudio, debido al proceso de evapotranspiración (ET), pueden explicarse por la influencia de las condiciones ambientales del sitio, así como por las características fisiológicas de las plantas. Headley *et al* (2012) afirman que la regulación de las aberturas de los estomas por las plantas de los humedales en respuesta a la variación micro climática, puede contribuir a una variabilidad en ET. Asimismo, algunos autores establecen que la evapotranspiración de las plantas acuáticas es manejada tanto por factores meteorológicos (radiación solar, la temperatura, velocidad del viento, déficit de presión de vapor, presión atmosférica) como por las características del medio ambiente circundante, y por lo tanto, es un proceso sensible a estos factores microclimáticos que cambian según la época: seca o lluviosa (Snyder y Boyd 1987; Glenn *et al* 1995; Wossenu 2004).

Se encontró una correlación positiva entre la ET de cada una de las coberturas con los factores: viento, radiación solar y temperatura del aire (Cuadro 1), lo cual concuerda con lo expuesto anteriormente. Además, todas las coberturas se correlacionaron negativamente con la humedad relativa tal y como lo exponen Pauliukonis y Schneider (2001), donde encontraron valores de correlación con la humedad relativa entre -0.14 y -0.46 para las especies *Typha latifolia*, *Hacer rubrum*, *Salix babylonica* y agua. Estos

valores negativos implican que al disminuir la humedad relativa, la atmósfera puede captar más agua en forma de vapor, la cual será proporcionada por la evaporación de las superficies y por la transpiración de las plantas. Sin embargo, debe considerarse que en el presente estudio el periodo de medición fue de 40 días (durante el inicio de la estación seca), mientras que en la mayoría de estudios los datos corresponden a periodos más largos de medición (años), por lo tanto, la sensibilidad al cambio estacional de estos ecosistemas debe tomarse en cuenta. Asimismo, es importante mencionar que todas las investigaciones antes mencionadas se han llevado a cabo en distintos sitios de estudio, donde se pueden presentar variantes en cuanto a las condiciones climáticas, la vegetación y otros factores propios de la región.

Por otro lado, la variabilidad en el comportamiento de las coberturas a lo largo del periodo de medición indica que además de la meteorología del sitio, se deben considerar los rasgos fisiológicos de las especies. Snyder y Boyd (1987) sostienen que las características fisiológicas de las plantas son tan importantes como los factores meteorológicos, en lo que respecta a las tasas de evapotranspiración por macrófitos acuáticos. De la misma forma, Koch y Rawlik (1993) fundamentan que parámetros fisiológicos como la conductancia estomática, pueden ser de gran importancia en humedales de zonas áridas, tropicales y sub-tropicales.

Las altas tasas de ET encontradas en *Thalia geniculata*, se deben al área foliar de la misma, así como a las características biológicas propias de la especie. De acuerdo con Medrano *et al* (2007) la superficie foliar total y la arquitectura de la planta determinan la pérdida de agua frente a una determinada demanda atmosférica. La planta desarrolla su arquitectura foliar en función de sus características genéticas y de la disponibilidad de recursos durante el crecimiento. Así, en función de la disponibilidad de agua, las plantas ajustan el tamaño y la cantidad de hojas, explicando los resultados obtenidos en *Thalia geniculata*. Por otra parte, *Neptunia natans* y *Eichhornia crassipes* demuestran no estar afectando significativamente los espejos de agua de la laguna, debido a que no se presentaron diferencias estadísticas con la cobertura espejo de agua. Snyder y Boyd (1987), en su estudio realizado en la especie *Eichhornia crassipes* manifestaron que el cubrimiento de la superficie por la planta, previene el contacto entre el agua y el aire, disminuyendo la pérdida de agua.

Typha dominguensis mostró un aumento de ET a inicios de la época seca. Esta situación puede resultar de importancia ecológica y práctica debido a que la especie está ocasionando un deterioro significativo del humedal, afectando el equilibrio hidrológico del ecosistema. (Calvo y Arias 2004). Por esta razón, es fundamental analizar el comportamiento y las características físicas de la misma.

Pauliukonis y Schneider (2001) en su estudio con el género *Typha* determinaron que las tasas de ET fueron significativamente altas por unidad de área foliar como resultado de la disposición de los estomas en la especie, ya que estos se encuentran tanto en la parte abaxial como adaxial de la superficie de las hojas (Kozlowski y Pallardy 1997; citados por Pauliukonis y Schneider 2001). Otro aspecto importante a destacar es que el estudio se basó en plantas jóvenes de la especie, se ha demostrado que las hojas más jóvenes con una productividad y tasas de crecimiento altas pueden tener una mayor ET (Koch y Rawlik 1993).

Según la adaptación de *Typha dominguensis* a la hipoxia (cantidad muy baja de oxígeno), es considerada una especie hidrófita que no sólo se adapta a sitios inundados gracias a la presencia del aerénquima (más del 60% del tejido de las raíces corresponde a poros o espacios) (Moreno e Infante 2010); sino que al mismo tiempo es altamente tolerante a la sequía, lo cual implica que a pesar de ser una especie C3 (Jones 1988), la misma puede optar por uno de los tres tipos de estrategias propuestas por Medrano *et al* (2007) para sobrevivir:

- 1- Ajustar el ciclo biológico a los meses con mayor disponibilidad de agua;
- 2- Tolerar la desecación, que consiste en un conjunto de modificaciones fisiológicas que permiten soportar un cierto grado de deshidratación de los tejidos sin reducción drástica de la actividad vital;
- 3- Evitar la deshidratación, aumentando la capacidad de suministro de agua y limitar su gasto, lo que aumenta la capacidad de permanecer y sobrevivir durante los períodos de sequía.

Esta última estrategia mencionada, sería la que mejor se ajusta a la condición de la tifa del estudio en su forma de aumentar la ET cuando disminuye el agua. Debido a que la especie absorbe mayor cantidad de agua cuando la época seca comienza a intensificarse, lo cual indica que la misma utiliza esta estrategia para reducir el gasto del recurso y ahorrarlo para mantenerse durante el período de sequía extrema. Por lo

tanto, si se evitara que la tifa invada la laguna a inicios de la estación seca, ayudaría a disminuir la pérdida acelerada de los espejos de agua de la laguna.

En síntesis, se puede afirmar que a pesar de que *Typha domingensis* es una especie invasora que ha llegado a convertirse en un problema para los espejos de agua, *Thalia geniculata* se encuentra afectando significativamente y en mayor medida que *Typha domingensis* la hidrología del humedal debido a las altas tasas de evapotranspiración encontradas; lo cual implicaría establecer un manejo de esta especie, de la misma forma que se realiza actualmente con la tifa.

Con respecto a las demás coberturas en estudio, se determinó que *Eichhornia crassipes* a pesar de ser una especie muy abundante en el humedal, no afecta en un alto grado el cubrimiento de los espejos de agua, debido a que la pérdida de agua por evapotranspiración es muy baja, con valores cercanos a la evaporación del agua. Por lo tanto, la presencia de la especie no presenta efectos adversos en la condición hidrológica de la laguna.

Las diferencias de hasta 3°C entre la temperatura del humedal y la de las coberturas, con variaciones de entre 26 y 35 °C en la temperatura de las coberturas y de 26 a 32°C para la laguna deben ser consideradas a la hora de analizar los datos. Pauliukonis y Schneider (2001) reportan en su estudio (llevado en cabo en Ithaca, New York) temperaturas muy similares entre el agua del lago (17-30 °C) y los lisímetros de aguas abiertas (16.5 hasta 31.25°C). El estudio mencionado muestra datos que difieren con los obtenidos en esta investigación, sin embargo, estas discrepancias pueden atribuirse a que el ecosistema se encuentra en un clima húmedo subtropical y además se presentan algunas diferencias en la metodología aplicada. Por estas razones, es de importancia considerar la investigación mencionada únicamente como un punto de referencia, pero no de comparación para efectos de este trabajo.

Por otra parte, German (2000) reporta que la temperatura media del agua osciló entre 23.1 °C y 27.6 °C en tres sitios distintos durante 1 año de medición. Este autor establece que dentro de los factores que afectan la temperatura superficial del agua se podría considerar: la profundidad del agua, el grosor de la cubierta vegetal, así como la temperatura del aire y la radiación solar. Esto explica las diferencias encontradas en el presente estudio, fundamentalmente debido a las diferencias de profundidad y a la incidencia de la radiación en el material de los lisímetros.

Además, la temperatura del agua está fuertemente ligada a la evapotranspiración, que a su vez es un factor importante en la cantidad de agua necesaria para el humedal y constituye un aspecto de gran interés por al menos tres razones: (1) la temperatura modifica las tasas de varios procesos biológicos clave (2) a veces constituye un parámetro de calidad del agua y (3) la temperatura del agua es determinante en la pérdida de agua por evaporación (Kadlec 2006). Por lo tanto, se puede concluir que las altas tasas de pérdida de agua por evapotranspiración de las especies en el sitio, se encuentre directamente afectada por la temperatura del agua. De esta forma, se recomienda la elaboración o utilización de un factor de corrección para esta variable con el fin de equilibrar dicho efecto, para lo cual se requieren más estudios.

Esta investigación busca determinar los coeficientes de cultivo obtenidos para las coberturas evaluadas a inicios de la época seca, de forma que se puedan extrapolar los resultados a de todo el humedal. Snyder y Boyd (1987) reportan valores de K_c (ET/ET_0) entre 1.31 y 2.52 para *Eichhornia crassipes* y de 1.05 a 2.50 para *Thypha latifolia*. Estos autores llevaron a cabo la investigación en una región de clima húmedo subtropical. Los valores obtenidos en este estudio para estas coberturas se hallan dentro de los rangos mencionados. Los resultados demuestran que a pesar de las diferencias en las condiciones meteorológicas de ambos sitios, las especies presentan un comportamiento similar con respecto al factor K_c . Sin embargo, no se encuentran reportes comparativos en la literatura para los valores de K_c obtenidos de las coberturas *Neptunia natans* y *Thalia geniculata*. Se debe considerar que estudios como el de Snyder y Boyd (1987) pueden presentar una variación de datos, debido a que se basaron en valores de K_c calculados en un periodo de medición de seis meses y bajo condiciones meteorológicas distintas.

En términos generales, los resultados presentados en este estudio son de gran utilidad e importancia para futuras investigaciones, tanto en el ámbito nacional como en otras regiones tropicales, en lo que respecta a la pérdida de agua por evapotranspiración y su impacto en zonas de humedal. Principalmente para la elaboración de planes de manejo de especies como *Thalia geniculata*, la cual demostró tener efectos negativos en los espejos de agua del humedal. Asimismo, la metodología empleada en esta investigación puede ser replicada con otras especies nativas e invasoras, de las cuales se tiene poco conocimiento de su repercusión en la hidrología de los humedales.

Conclusiones y Recomendaciones

- ✓ Las condiciones meteorológicas se encuentran relacionadas en diferente medida con la pérdida de agua de las coberturas evaluadas del humedal Palo Verde.
- ✓ *Thalia geniculata* y el espejo de agua, fueron las coberturas que mostraron el mayor y el menor valor de ET, respectivamente. De esta forma, se recomienda establecer un manejo de la especie *Thalia geniculata*, similar al que se realiza actualmente con *Typha domingensis*.
- ✓ Si se evitara que la tifa invada la laguna a inicios de la estación seca, ayudaría a disminuir la pérdida acelerada de los espejos de agua de la laguna.
- ✓ Se presentaron diferencias de hasta 3°C entre la temperatura de los lisímetros y la temperatura medida en el humedal, por lo tanto, se recomienda la utilización de algún factor de corrección como aspecto importante que se debe considerar en próximas investigaciones.
- ✓ El coeficiente de cultivo fue mayor para la cobertura *Thalia geniculata* y menor para el espejo de agua.
- ✓ Se recomienda ampliar el período de medición con el fin de observar el comportamiento de las condiciones meteorológicas y la variación de la evapotranspiración.
- ✓ Reforzar con estudios la fisiología, anatomía y comportamiento de las especies evaluadas, principalmente aquellas donde existen pocos reportes.

Referencias

Allen, S.I. 1990. Measurement and estimation of evaporation from soil under sparse barley crops in northern Syria. *Agricultural and Forest Meteorology*.49: 291-309.

Allen, R; Pereira, L; Raes, D; Smith, M.2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, IT. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT).299 p.

Arce, M. 2005. Laguna Palo Verde recupera humedal y población de aves. (en línea). *La Nación*, San José, CR. Consultado 3 mayo 2013. Disponible en http://www.nacion.com/ln_ee/2005/marzo/07/aldea0.html

Ávalos, A. 2004. Vuelven los amos de humedal. (en línea). *La Nación*, San José, CR. Consultado 3 mayo 2013. Disponible en <http://www.nacion.com/viva/2004/marzo/16/portada.html>.

Badilla, S. 1988. Desastres naturales provocados por inundaciones: El caso de una sección inferior del Río Tempisque. Tesis Lic. Heredia, Costa Rica: UNA. Escuela de Ciencias geográficas. 156 p.

Calvo, J.C Arias, O. 2004. Restauración hidrológica del humedal Palo Verde. *Ambientico*. 129:7-8.

Crow, G. 2002- Plantas acuáticas del Parque Nacional Palo Verde y el valle del río Tempisque Costa Rica. Trad. Tatiana Facio. Heredia, San José. Editorial INBio. 300 p.

Ellison, A. 2004. Wetlands of Central America. *Wetlands Ecology and Management*. 12:3-55.

Estación Meteorológica Palo Verde. Base de datos meteorológicos e hidrológicos periodo 2008-2012. (en línea). Consultado 12 mayo 2013. Disponible en <http://www.ots.ac.cr/meteoro/default.php?pestacion=1>

German, E. 2000. Regional Evaluation of Evapotranspiration in the Everglades. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 00-4217. Florida, US. 48 p.

Glenn,E; Lewis, T; Frye, R; Riley, J; Baumgartner, D. 1995. Effects of salinity on growth and evapotranspiration of *Typha domingensis* Pers. Aquatic botany. 52: 75-91.

González, E; Bufford, J. 2012. Manejo del humedal Palo Verde y de las comunidades de aves asociadas a sus diferentes hábitats. Ambientales. 43:7-16.

Goulden, M; Litvak, M; Miller, S. 2007. Factors that control *Typha* marsh evapotranspiration. Aquatic botany. 86: 97-106

Halls, A.J. (ed.). 1997. Wetlands, Biodiversity and the Ramsar Convention: The Role of the Convention on Wetlands in the Conservation and Wise Use of Biodiversity. Ramsar Convention Bureau, Gland, Switzerland. (en línea). Consultado 25 set. 2012. Disponible en http://www.ramsar.org/cda/en/ramsar-pubs-books-wetlands-biodiversity-21181/main/ramsar/1-30-101%5E21181_4000_0__

Hartshorn, G.S.1983. 7 Plants. Introduction. In Costa Rican natural history. pp. 118–157, Chicago, IL, The University of Chicago Press, US. (en línea). Consultado 17 mayo 2013. Disponible en: <http://www.ots.ac.cr/bnbt/1899.html>.

Headley, T; Davison, L; Huett, D; Müller, R. 2012. Evapotranspiration from subsurface horizontal flow wetlands planted with *Phragmites australis* in subtropical Australia. Water Research. 46: 345-354.

Hernández, D; Gómez, J. 1993. La flora acuática del humedal Palo Verde. Heredia, CR. EUNA. 131 p.

Holdridge, L.R., 1967. Life Zone Ecology. Tropical Science Center, San José, CR.

Huggett, R.J. 2007. Fundamentals of geomorphology 2^a ed. CA y US. Editorial Routledge.483 p.

Kadlec, R. 2006. Water temperature and evapotranspiration in surface flow wetlands in hot arid climate. Ecological Engineering. 26: 328-340.

Koch, M; Rawlik, P. 1993. Transpiration and stomatal conductance of two wetlands macrophytes (*Cladium jamaicense* and *Typha domingensis*) in the subtropical Everglades. *American Journal of Botany*. 80 (10): 1146-1154.

Jones, M.B. 1988. Photosynthetic responses of C3 and C4 wetland species in a Tropical swamp. *Journal of Ecology*. 76: 253-262.

Lot, A; Novelo, A. 2004. Iconografía y estudio de plantas acuáticas de la ciudad de México y sus alrededores. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, MX. 206 p.

Mao, L; Bergman, M; Tai, C. 2002. Evapotranspiration measurement and estimation of three wetland environments in the upper St. Johns River Basin, Florida. *Journal of the American Water Resources Association*. 38(5): 1271-1285.

McCoy, M. 1996. The seasonal, freshwater marsh at Palo Verde National Park. Latin America Regional Livestock Assesment Workshop. San José, CR. pp 205-211. (Regional Wildlife Management Program, National University, Costa Rica). (en línea). Consultado 2 oct. 2012. Disponible en <http://books.google.es/books?hl=en&lr=&id=HekqAAAAYAAJ&oi=fnd&pg=PA205&dq=The+seasonal,+freshwater+marsh+at+Palo+Verde+National+Park&ots=0L6sHDF5XO&sig=rpXpfdPmv20EHkfsvz4xWQwmQc#v=onepage&q=The%20seasonal%20freshwater%20marsh%20at%20Palo%20Verde%20National%20Park&f=false>.

Medrano, H; Bota, J; Cifre, J; Flexas, J; Ribas-Carbó, M; Gulías, J. 2007. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. Universidad de Alicante. *Redalyc: Investigaciones Geográficas*. 43: 63-84.

Moors, E. 2008. Evaporation. *Climate and the Hydrological Cycle*. Eds: Bierkens, M; Dolman, H; Troch, P. IAHS. pp 23-41.

Moreno, P; Infante, D. 2010. Veracruz Tierra de ciénagas y pantanos. Instituto de Ecología A.C (INECOL). Veracruz, MX. 412 p.

Ortiz, E. 2008. Atlas digital de Costa Rica 2008. (CD-Rom). Cartago, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 1 CD-Rom.

Pauliukonis, N; Schneider, R. 2001. Temporal patterns in evapotranspiration from lysimeters with three common wetland plant species in the eastern United States. *Aquatic botany*. 71: 35- 46.

Rojas, M; Campos, M; Alpízar E; Bravo J; Córdoba, R. 2003. El Cambio Climático y los Humedales en Centroamérica: Implicaciones de la variación climática para los ecosistemas acuáticos y su manejo en la región. UICN. 38 p.

Santana, D. 2007. Estudio del uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos, CU. 14 p.

Snyder, R; Boyd, C. 1987. Evapotranspiration by *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms and *Typha latifolia* L. *Aquatic botany* 27: 217-227.

Summerfield, M. A.1991. Global geomorphology: an introduction to the study of landforms Longman Scientific & Technical. 537 p.

Trama, F.A; Rizo-Patrón, F., Kumar A; González, E; Somma, D; Michael B. McCoy, C. 2009. Wetland Cover Types and Plant Community Changes in Response to Cattail-Control Activities in the Palo Verde Marsh, Costa Rica.

Tuñón, J; Morell, I; Ferriols, N. S. 1999. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Observaciones prácticas sobre el cálculo del balance de agua en el suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter, C. Tascón. Tenerife, ES. Pp 45-51.

UICN (Unión Mundial para la naturaleza, NO). 2002. Seguimiento de las Directrices de la Convención RAMSAR en la Planificación de los Humedales de Importancia Internacional en Centroamérica. San José, CR. 72 p.

UNESCO.1971. Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. Ramsar, Irán.

Vaughan, C; McCoy, J; Fallas, H; Cháves, G. Barboza, G; Wong, J; Rau, M. Carranza y M; Carbonell, M. 1994. Plan de Manejo y Desarrollo Parque Nacional Palo Verde y Reserva Biológica Lomas Barbudal. Contrato SENARA-BID-MIRENEM-UNA. Universidad Nacional. 215 p.

Wossenu, A. 2004. Evapotranspiration in the Everglades; comparison of Bowen ratio measurements and model estimations. Florida, USA.

Anexos

Anexo 1. Porcentaje de incidencia de las especies vegetales presentes en los espejos de agua del humedal Palo Verde, Costa Rica. Porcentaje de incidencia relacionado a 348 unidades muestrales distribuidas en 6 parcelas de 400 m².

Especie	Incidencia (%)
Neptunia natans	49.7
Paspalum repens	25.0
Sagittaria guayanensis	11.2
Leersia hexandra	6.0
Thalia geniculata	6.0
Lemna aequinoctialis	4.0
Cyperus articulatus	3.8
Eichornia crassipes	3.1
Wolffiella welwitschii	1.3
Echinodorus paniculatus	0.8
Typha domingensis	0.7
Najas arguta	0.6
Spirodela polyrhiza	0.4
Ipomoea carnea	0.1
Eichornia heterosperma	0.0
Najas guadalupensis	0.0

Anexo 2. Evapotranspiración real (ET) y evapotranspiración de referencia (Eto) calculada con Penman-Monteith, para las seis coberturas, durante 40 días de medición, del estudio en el humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

Fecha	Eto (mm d ⁻¹)	ET (mm d ⁻¹)					
		<i>Eic. cra.</i>	Espejo de Agua	Mezcla	<i>Nep. nat.</i>	<i>Tha. gen.</i>	<i>Thy. dom.</i>
16/12/2012	6.93	9.14	6.89	11.52	9.75	18.80	11.25
17/12/2012	7.11	8.48	7.48	11.90	8.75	18.12	11.11
18/12/2012	7.11	7.29	7.29	11.27	7.82	19.24	9.96
19/12/2012	6.96	8.78	6.36	11.29	8.74	19.97	10.74
20/12/2012	6.62	9.15	6.73	10.63	8.34	18.20	10.37
21/12/2012	6.38	8.72	6.76	12.02	6.84	16.65	11.25
22/12/2012	5.92	9.22	8.97	11.48	10.29	14.88	12.19
23/12/2012	5.88	8.71	7.44	10.50	8.93	19.14	10.63
24/12/2012	6.24	6.99	5.32	11.41	9.09	15.95	10.63
25/12/2012	6.53	9.09	7.13	11.40	6.38	16.84	10.63
26/12/2012	6.36	6.44	6.27	7.87	6.11	14.03	8.80
27/12/2012	5.11	5.10	4.79	8.83	5.00	10.33	7.77
28/12/2012	6.18	8.83	5.98	10.98	8.97	17.07	11.34
29/12/2012	6.00	7.13	7.47	11.47	6.89	16.97	12.52
30/12/2012	6.20	9.67	7.18	11.69	8.72	15.15	12.86
31/12/2012	6.64	12.44	8.51	14.35	12.44	19.46	14.67
01/01/2013	6.47	10.31	9.57	13.61	11.69	16.80	13.50
02/01/2013	6.89	12.06	8.51	17.15	8.41	22.67	22.94
03/01/2013	6.63	11.78	8.38	14.30	9.87	18.97	15.09
04/01/2013	6.46	8.96	9.24	14.95	9.70	17.45	14.86
05/01/2013	6.62	10.21	8.98	15.44	9.50	20.30	15.99
06/01/2013	6.78	10.04	9.59	16.29	10.47	18.71	17.51
07/01/2013	6.84	9.82	8.83	15.29	10.31	19.31	12.78
08/01/2013	6.98	9.98	8.26	15.15	9.46	17.99	15.22
09/01/2013	7.03	9.70	9.11	15.61	9.83	19.62	14.96
10/01/2013	6.50	10.84	9.63	16.33	10.33	19.09	17.87
11/01/2013	6.70	9.74	9.28	13.10	9.07	15.16	14.78
12/01/2013	6.72	9.60	6.75	13.29	8.91	15.84	12.60
13/01/2013	7.38	10.96	9.32	16.33	8.48	17.01	16.83
14/01/2013	7.02	10.98	12.10	19.21	13.48	19.88	20.55
15/01/2013	7.66	9.42	10.25	14.23	10.39	14.08	15.53
16/01/2013	6.96	8.52	8.58	14.96	8.56	14.88	15.48
17/01/2013	6.89	10.25	8.52	12.55	9.55	14.71	15.69
18/01/2013	5.28	9.57	6.93	11.20	8.85	12.12	13.82
19/01/2013	6.71	9.76	9.84	15.26	9.52	16.14	17.01
20/01/2013	6.66	10.20	9.94	14.92	10.31	16.79	18.41
21/01/2013	6.77	9.83	9.91	15.03	9.93	15.09	18.31
22/01/2013	6.55	11.13	9.90	14.85	10.27	15.37	18.19
23/01/2013	6.82	10.44	10.13	15.66	10.10	16.54	18.14
24/01/2013	6.78	10.32	7.06	14.49	9.78	15.72	17.78

Anexo 3. Matriz de correlaciones de la evapotranspiración con las variables meteorológicas, área foliar y temperatura de los lisímetros, del humedal Palo Verde, Parque Nacional Palo Verde, Costa Rica.

	ETR prom.	Eto	Temp. del aire.	Temp. lisím.	Prec.	Rad. acum.	Hum. rel.	Vel. del viento	Presión atm.
ETR prom.	1.00	0.25	0.24	-0.26	-0.28	0.34	-0.37	0.24	0.09
Eto	0.25	1.00	0.36	0.55	-0.63	0.83	-0.45	0.36	0.04
Temp. del aire.	0.24	0.36	1.00	0.03	-0.14	0.47	-0.61	1.00	-0.34
Temp. lisím.	-0.26	0.55	0.03	1.00	-0.10	0.43	-0.03	0.03	0.12
Prec.	-0.28	-0.63	-0.14	-0.10	1.00	-0.53	0.49	-0.14	-0.27
Rad. acum.	0.34	0.83	0.47	0.43	-0.53	1.00	-0.73	0.47	0.15
Hum. rel.	-0.37	-0.45	-0.61	-0.03	0.49	-0.73	1.00	-0.61	-0.33
Vel. del viento	0.24	0.36	1.00	0.03	-0.14	0.47	-0.61	1.00	-0.34
Presión atm.	0.09	0.04	-0.34	0.12	-0.27	0.15	-0.33	-0.34	1.00

ETr prom: Evapotranspiración promedio (mm); **Eto:** Evapotranspiración de referencia (mm); **Área foliar** (cm²); **Temp. del aire:** Temperatura del aire (°C); **Temp.lisím:** Temperatura de los lisímetros (°C); **Prec:** Precipitación (mm); **Rad. solar. acum:** Radiación acumulada (W/m²); **Hum. rel:** Humedad relativa (%); **Vel. del viento:** Velocidad del viento (m/s); **Presión atm:** Presión atmosférica (mbar).

