

Celda para Medición de la Evaporación Real en Suelo Desnudo no Saturado

Péricles Alves Medeiros

Departamento de Engenharia Sanitária y Ambiental / CTC / Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis / SC - BRASIL
pericles@ens.ufsc.br

Recebido: 14/07/03 - revisado: 19/12/03 aceito: 20/05/05

RESUMEN

Este trabajo trata de evaporación real de suelo desnudo no saturado y complementa una investigación anterior sobre balance hídrico en relleno sanitario con basura domiciliar urbana, en escala casi real. Una celda portable fue diseñada y desarrollada especialmente para determinar aquel primer parámetro a través de pesajes sucesivos con balanza de precisión. Asimismo, un pequeño evaporímetro de tanque fue construido para determinar la evaporación del agua. Los resultados de los dos aparatos fueron contrastados con la serie histórica del tanque "Clase A" de la estación meteorológica más cercana. La evaporación de suelo desnudo también fue determinada a través de tres sencillas simulaciones matemáticas. En ese caso, se utilizaron adecuados coeficientes de tanque y de cultura para el estadio inicial justo después de una sembradura. Una búsqueda en la literatura permitió una amplia comparación de resultados medidos en distintos climas. Por fin, se considera que la celda a pesar de su bajo coste, presentó funcionamiento totalmente satisfactorio.

Palabras-clave: evaporación de suelo desnudo; modelos físicos; lisímetros.

INTRODUCCIÓN

Dentro del ciclo hidrológico, uno de los procesos más complejos y de difícil monitoreo exacto es la evapotranspiración. Hay muchos tipos de suelos, manejos, vegetación y climas. Tucci (1993) afirma que: "informaciones confiables sobre evapotranspiración real son escasas y de difícil obtención ya que demandan un largo tiempo de observação y costan muy caro". Para proyectos de regadíos ese parámetro es importante pues, en muchos casos, es muy útil en la determinación de la necesidad hídrica de un cultivo. La evapotranspiración depende del clima y además, de las propiedades del perfil del suelo. En ese último caso, se tiene realmente algunos parámetros de difícil determinación. Una manera de medir el poder evaporativo de la atmósfera, es la utilización evaporímetros como los atmómetros y tanques de evaporación. En los primeros, hay un recipiente con agua conectado a una superficie porosa como papel, porcelana, etc. Esos, son baratos, pequeños y portables, pero de poca confiabilidad. Como ejemplos, se tiene el evaporímetro de Piché, Livinstone y Bellani. En los tanques, el agua evapora libremente a través de su superficie. Existen muchos modelos de tanques pero aquí se utilizarán dos tipos: el modelo "Clase A" del United States Weather Bureau por ser de gran utilización en el mundo y un pequeño de 9,0 litros. El tanque Clase A tiene 1,21 metros de diámetro interno y, aparte de la variación de nivel del agua, hay que medirse también la lluvia ocurri-

da. Para su adecuada operación necesita mantenimiento, reposición de agua y cuidados con los animales que pueden beber el agua. A veces, debido a un aguacero, corren el riesgo de rebozamiento invalidando la lectura del nivel del agua. Para la determinación de la evaporación de un lago o la evapotranspiración de referencia, se corrige los resultados del dicho tanque con coeficientes empíricos adecuados a cada caso. Varios autores establecieron modelos matemáticos de variado grado de complejidad, o fórmulas para determinación de la evapotranspiración en distintas situaciones. La precisión de los resultados, muchas veces no son buenas incluso en modelos muy elaborados exactamente por exigiren un gran número de datos a veces de cara obtención. Registra-se aquí solamente algunos colaboradores más clásicos como Penman (1948), Monteith (1965), Jensen (1973), Doorembos et al. (1977), Ritchie (1972), Blaney-Criddle (1950), Hargreaves (1994), Thornthwaite (1939), etc. Más adelante, en la Tabla 1, para comparación de resultados, se presenta otros autores más actuales como por ejemplo Yuen et al (2001). En ese estudio, el autor presenta resultados de la aplicación del modelo HELP - Schroeder et al (1994) y modelo de Jensen et al (1970, 1971, 1990).

En cuencas reales, se puede separar la evapotranspiración como incógnita dentro de un balance hídrico global. En ese caso, la lluvia y el escurrimiento superficial son monitorados en largo tiempo.

Con el control de la humedad en varias camadas del suelo también se puede obtener la evapotranspiración

por sucesivos muestreos de ese parámetro. Para la medición de la humedad se puede utilizar el tensiómetro, balances hídricos con pesajes de muestras del suelo, sonda de neutrones, TDR, etc.

La evapotranspiración real de un suelo (ETR) puede ser obtenida indirectamente a través de un balance hídrico en un lisímetro. Este, resumidamente, es un volumen cerrado de suelo no alterado y en su sitio mismo. El monitoreo periódico del grado de humedad, lluvia ocurrida o riego artificial, líquidos percolados y, a veces, peso total del aparato (o presión sobre neumáticos), permite la determinación de la ETR como incógnita. En este trabajo, para comparaciones, se utilizaron mediciones hechas por otros autores en distintos tipos de lisímetros, micro-lisímetros o celdas diversas. A continuación, un resumen de algunos trabajos utilizados con esa técnica. Mellouli et al (2000) investigaron las pérdidas por evapotranspiración en suelo desnudo en un cultivo de almendras en el sur de España y otro, de olivos, en Túnez. Los autores utilizaron celdas de 48,5 por 48,5 por 50,0 cm. En ese caso, la lluvia fue artificial con simulador. La evaporación real del suelo desnudo fue determinada por una integración numérica de varias capas en las cuales la humedad era medida con la técnica de sondas de TDR (Time Domain Reflectometry). Ese proceso considera una relación entre la constante dieléctrica aparente del suelo y la humedad volumétrica. Menziani et al (1999) en el Lido de Venezia, estudiaron la evaporación de la fina arena de la playa con un lisímetro enterrado de 3141,6 litros de volumen. La investigación empezó con el suelo totalmente saturado y la evaporación es determinada por una integración de las varias capas de arena. En ese caso, también se utilizó la TDR. Jackson et al (1999) en Kenia, usó 24 micro-lisímetros de 2,0 litros en suelo desnudo bajo sombra de árboles y, también, bajo sol. Los pequeños lisímetros fueron pesados diariamente para el cálculo de su balance hídrico. Mwendera et al (1997), en Bélgica estudió la influencia de dos tipos de manejos de la superficie de suelo desnudo en la evaporación. Aquí se utilizaron muestras con micro-lisímetros de 5,0 litros, pesadas en laboratorio. Se calculó la evaporación por integración numérica de 7 capas de suelo. Plauborg (1995) en Dinamarca, con dos métodos: TDR y muestras de micro-lisímetros de 0,8 litros, estudió la evaporación de suelo desnudo en campo experimental. Las pequeñas celdas eran usadas para la retirada sistemática de muestras, pesajes y posterior retorno a su sitio original. Wallace et al (1999), en Kenia, trabajaron con sucesivos pesajes de micro-lisímetros de 0,8 litros determinando la misma comentada evaporación con y sin sol. Los autores utilizaron las mediciones para elaborar un modelo matemático. Qiu et al (1998), en Japón, también con micro-lisímetros de 18,0 y 78,0 litros, hicieron un modelo matemático relacionando evaporación con temperatura de la superficie del suelo. Pauliokonis et al (2001), en USA, estudiaron evapo-

ración de suelos saturados de un lago con y sin vegetación acuática. Fueron utilizados lisímetros de 34,3 litros de volumen. Yuen et al (2001) en Australia, investigaron el balance hidráulico de un relleno sanitario real. En este caso, utilizaron modelos matemáticos de Jensen (1970, 1971, 1990) y el modelo H.E.L.P. evaluado por Schroeder et al (1994). Para el balance, la evapotranspiración de la capa de suelo de cobertura fue determinada por los referidos modelos. Los autores contrastaron los resultados calculados con la evapotranspiración potencial del sitio. Daamen et al (1995) en región semi árida de Níger, utilizaron muestras de suelo con el método de micro-lisímetros de 1,8 y 0,2 litros para la determinación de la evaporación de suelos. Otro caso puede ser el suelo de cobertura cerrando un relleno sanitario. Este último, fue el caso del presente trabajo en lo que se midió con un modelo reducido (celda) la evaporación real de un relleno sanitario de laboratorio cubierto con arena gruesa sin vegetación. Más adelante, se continúa y desarrolla específicamente este tema.

Como evapotranspiración potencial se entiende la máxima producida por un suelo con vegetación baja cubriendo toda el área y, siempre con suficiente humedad. La definición exacta de evapotranspiración potencial no es tan sencilla y varía según el autor y metodología adoptada. Así que muchos autores reemplazan ese parámetro por otro más adecuado que es la “evapotranspiración de referencia” (ET_o) a seguir comentada. Esa puede ser relativa a alfalfa o césped, bajo determinadas condiciones. Aparte de los sofisticados modelos matemáticos comentados, el más sencillo es el del tanque “Clase A”. Con sus datos, se puede llegar a la evapotranspiración de referencia (ET_o) y de una determinada cultura a través de las fórmulas:

$$ET_o = K_t \cdot ECA \quad (1)$$

$$ETP_c = K_c \cdot ET_o \quad (2)$$

Todos los símbolos están agrupados en sección específica más adelante. Según Dorrenbos and Pruitt (1977), el valor de K_t, sitúase en el rango de 0,35 hasta un 0,85. En la gran mayoría de los casos, varía de 0,50 hasta 0,80. Jensen (1974), Dorrenbos y Pruitt (1977), y Hounam (1973) discuten otros factores adicionales que influyen en la evaporación del tanque “Clase A” como por ejemplo, el color de la pintura. El ciclo de crecimiento de una planta produce distintas demandas de agua. Normalmente se divide ese desarrollo en 4 estadios: 1º) Inicial, 2º) Vegetativo, 3º) Floración y 4º) Maduración. En el primer período la evapotranspiración es prácticamente igual a la evaporación de suelo desnudo. En ese caso, se produce la

evapotranspiración mínima. En los primeros días, la evapotranspiración situase, en general, entre 25% y 65 % de la ETo. Con el desarrollo del cultivo, llega a 100 % (muchas veces incluso un poco más). La Figura 1 enseña la variación típica del coeficiente de cultura (Kc).

ORIGEN DE ESTE TRABAJO

Este trabajo es practicamente un sub producto de una otra amplia investigación de laboratorio ubicada en el campus de la UFSC, en Florianópolis-SC. Fue desarrollado en el marco del Programa de Saneamiento Básico, PROSAB III desarrollado en 2001: “Tecnologias de Apoio ao Desenvolvimento de Aterros de Resíduos Urbanos para Pequenos Municípios”. Ver Medeiros et al (2002-a), Medeiros et al (2002-b), Medeiros et al (2002-c). Para una referencia a ese proyecto mayor, en ese texto, se utilizará la expresión: “proyecto de origen”. Ese fue un aparato experimental con 3 celdas de 1,54 x 1,57 x 3,35 metros cada, y rellenas con basura domiciliar urbana de Florianópolis. Arriba de la basura, se colocó una capa de arena gruesa con 300 mm de espesor. Entre los varios objetivos de dicho proyecto, lo que interesa aquí es el balance hidráulico de las dichas celdas. Más concretamente, dentro de ese balance el mayor problema fue como medir la evaporación real del conjunto. La importancia de la determinación de la evaporación (o evapotranspiración si hubiera alguna vegetación) de un relleno sanitario está basada en, por lo menos, dos aspectos. Primero, porque ese parámetro es absolutamente necesario para la realización del balance hídrico del sistema que está integrado con el ambiente abierto. Por último, según Maurer (1994), Krol et al (1994), la moderna tendencia de proyecto de un relleno es considerarlo como una “wet cell” es decir, un biorreactor. A veces, los líquidos percolados son recirculados para acelerar la decomposición. Continúa el autor: “...un mejor conocimiento de la hidrología de un proyecto de relleno sanitario por lo tanto, revelase más crucial ya que la decomposición de la basura, tratamiento local del lixiviado y producción de gas están muy relacionados con el grado de humedad”.

DISEÑO Y OPERACIÓN DE LA CELDA

De este punto para adelante, se utilizará la palabra “celda” para definir el modelo reducido destinado a medir la evaporación real del “proyecto de origen”. La determinación de la evaporación real de un suelo desnudo, no saturado, con los modelos matemáticos existentes o fórmulas sencillas, no es una tarea fácil. Depende de tipo de suelo, espesor, grado de adensamiento, perfil de humedad disponible, clima, vientos, temperatura, radiación, cercanías del experimento, etc. Por todo ello, el resultado muchas veces no es muy seguro. Para su validación, siempre se necesitaria de contraste con datos experimentales realmen-

te observados. Esta investigación está direccionada a esa segunda via. Es decir, se optó por un modelo físico en escala reducida en el cual la evaporación fuera determinada por pesajes sucesivos. Así que la idea fue de un tipo de lisímetro, o sea, de un volumen cerrado y totalmente controlado. Aquí se pone de manifiesto que este diseño es original y no fue adaptado de ningún otro. Aunque pueda ser mejorado o criticado, es único.

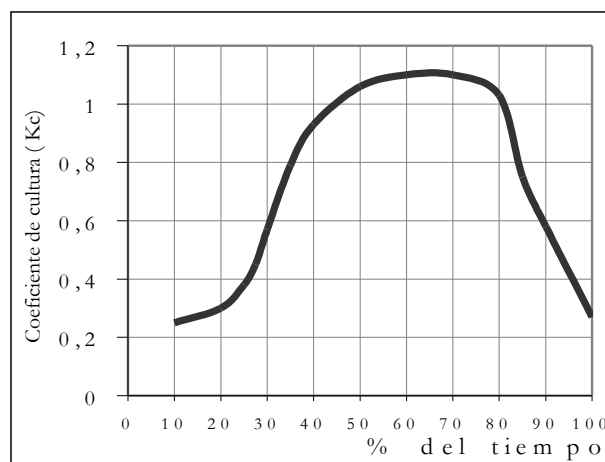


Figura 1 - Evolución típica del coeficiente de cultura de la sembradura a la cosecha.

El primer problema fue el tamaño adecuado. Lo mejor modelo seria, al principio, el más grande y, por ello, el más representativo de la realidad. Desafortunadamente, se verificó que la precisión de las balanzas disminuyen con la carga. En este caso, por tratarse de una variable muy sensible, necesitamos de una gran precisión y, por ello, la carga no podría ser muy grande. Considerando el corto presupuesto y los equipos disponibles, se utilizó finalmente una balanza piezoeléctrica digital con capacidad máxima de 50 kg y precisión de 2,0 gramos (error máx de 0,01 %). El paso siguiente fue la forma de la celda. El plato de la balanza solo tenía 35 por 45 cm. Así que la base del aparato tendría que ser pequeña. Como la balanza necesita protección tubo que quedar un poco lejos y así, para cada pesaje habría que realizar un pequeño transporte. Así que, aparte, del peso, la celda tendría que ser fácilmente transportable. Por todo ello, al final, se eligió el cilindro como mejor forma. Un tubería de PVC de 200,3 mm de diámetro externo fue el escogido. Dentro, fue colocado una camada de la dicha basura de 300 mm de espesor y, arriba, una de capa de arena gruesa también con 300 mm de altura. Es decir, la cobertura quedó con espesor exactamente igual al “proyecto de origen”. La arena posee $d_{50} = 0,75$ mm, coeficiente de uniformidad (d_{60}/d_{10}) = 4,27 y masa específica aparente húmeda de 1350 kg m⁻³.

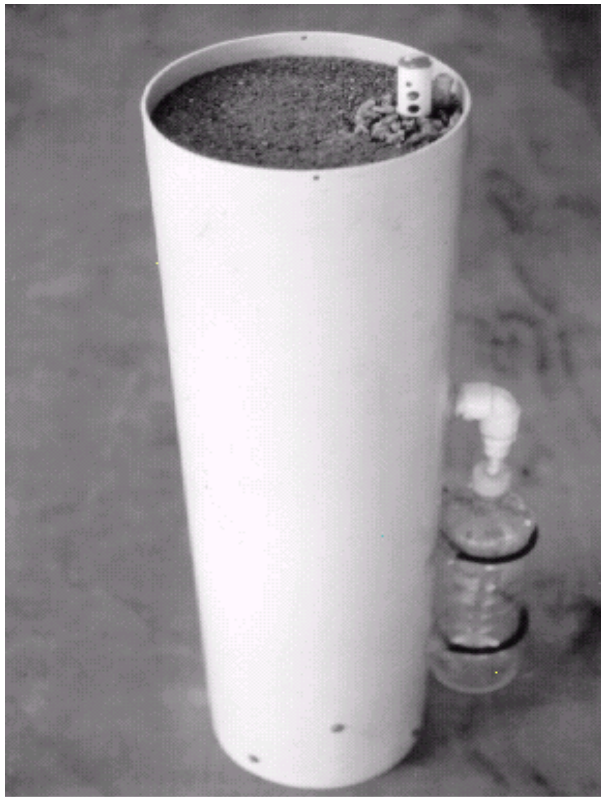


Figura 2 - Montaje final de la celda

Debido al transporte y manejo, el peso de la celda tube que ser lo menor posible dentro de la representatividad deseable. Los principales datos de la composición gravimétrica de la basura, en el día “zero” (07/06/2001), eran: 57,56 % de material orgánico; 6,85 % de papel; 3,09 % de cartón; 9,94 % de plástico blando; 2,42 % de plástico duro; 4,68% de trapos y cueros; 8,69 % de pañales y basura sanitaria y 6,77 % de otros materiales. Los grados de humedad inicial de la basura y de la arena (en peso) fueron de 55,2 y 4,75 % respectivamente. Las masas específicas aparentes húmedas fueron: 1350,00 y 1322,48 kg m^{-3} respectivamente para arena y basura. Abajo de la basura, para sangrias, se diseñó un pequeño embalse y bajo presión atmosférica. La altura total de la celda resultó siendo 700 mm. Para la escorrentía superficial, fue diseñado un sistema con ajuste de la entrada de agua superficial debido a los asentamientos de la materia orgánica y basura. Aquí se presentan tan solamente las soluciones finales y no la mayor parte del trabajo que fue el desarrollo de la idea inicial. Por fin, un otro sistema mantiene la presión del embalse inferior siempre igual a la atmosférica pero sin permitir la entrada de lluvia para el embalse. En este balance no se consideró el arrastre de gases junto con el vapor de agua. Asimismo, del líquido sangrado del embalse no se retiró la materia sólida disuelta. Es decir, el balance considera que toda la materia evaporada o drenada sea 100 % líquido. La

Figura 2 enseña una fotografía final de la celda. Con relación a precipitación, al principio, se pensó en lluvia artificial. Se tendría que elegir un hietograma de proyecto o algún tipo de investigación sobre lluvias intensas de la región. Por fin, se eligió la lluvia natural y la celda fue colocada sobre el suelo, justo al lado del “proyecto de origen” sometándose a la intemperie. El suelo de la cercanía era desnudo y la distancia mínima hasta el borde fue cerca de 10 metros. Así que las condiciones del experimento son de una capa de arena sobre un relleno sanitario. El tanque Clase A más cercano es rodeado de césped y ubicado a 15 km de distancia como se explicó anteriormente. En este estudio preliminar no se desarrolló ninguna corrección adicional respecto a detalles de las condiciones de borde, que no sean las originales de Doorenbos y Pruitt (1977) explicadas más adelante.

METODOLOGIA

El resumen de la metodología elegida es:

- 1) En el “tiempo zero” se tiene un volumen cerrado con condiciones iniciales conocidas: grado de humedad de la arena y de la basura igual al “proyecto de origen” y peso total del aparato completo (18295 gramos).
- 2) En el “tiempo 1” (en general, después de 4 a 7 días) la celda es pesada otra vez .
- 3) La lluvia ocurrida en ese período es medida en un pluviómetro al lado del experimento.
- 4) Una ecuación de balance hídrico determina la evaporación real del período como incógnita.
- 5) La evaporación medida del período es dividida por el número de días.
- 6) Repite-se el procedimiento pero siempre considerando las alteraciones de peso producidas por sangrias del embalse inferior o pequeños arreglos.

Lista de Símbolos

ECA	evaporación de tanque “clase A”, (mm día^{-1}).
ET_o	evapotranspiración de referencia, (mm día^{-1}).
ETP_c	evapotranspiración potencial de la cultura, (mm día^{-1})
ETR	evapotranspiración real de la cultura, si hubiera baja disponibilidad hídrica: ETR es menor o igual a ETP _c . (mm día^{-1})
ES	evaporación de suelo desnudo, simulada a diario
K_t	coeficiente de tanque “clase A”
K_c	coeficiente de la cultura
d₁	diámetro interno del cilindro: 194,9 mm.
d₂	diámetro medio [$(d_1 + d_3) / 2 = 197,6 \text{ mm}$]
d₃	diámetro externo del cilindro (= 200,3 mm)
A₁	area $\pi (d_1)^2 / 4$ (= 29834,14 mm^2)
A₂	area $\pi (d_2)^2 / 4$ (= 30666,47 mm^2)

A₃	area $\pi (d_3)^2 / 4$ (= 31510,24 mm ²)
P	precipitación acumulada del período, en mm.
E	evaporación acumulada del período, en mm.
E*	evaporación de suelo desnudo diaria média del período, en mm.dia ⁻¹
n	número de días de 1 período (aprox. 4, 5, 6,7 días)
N	número de ordem
W_i	peso total de la celda, en el tiempo “i”, en gramos.
W_{i-1}	lo mismo, en el tiempo anterior, en gramos.
F	peso acrecido (+) o retirado (-) del modelo, en el período, debido sangria del embalse y arreglos (g)
ESC	escorrentía superficial acumul. del período, en mm
I	infiltración acumulada del período, en mm
a, b	coef. lineal y angular de la reta ajustada de B. Criddle
p	porcentaje de horas con sol (B. Criddle)
t	temperatura media mensual (°C)
Ic	Índice de calor (Thornthwaite)
fc	fator de correção en función de latitud y mes

Determinación de la evaporación media diaria

Por balance hídrico en la celda, la fórmula final para el cálculo de la evaporación media diaria en cada período, en mm dia⁻¹ es:

$$E^* = [0,03352 (30,66647 P + W_{i-1} - W_i + F)] / n \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En realidad, la celda fue monitoreada por 2 años en el “proyecto de origen”. En este artículo, se enseñaron los resultados del 07/Jun/2001 al 06/Nov/2001. Más adelante, para contrastes, se utilizó tan solo del 08/Jun/2001 hasta el 30/Sep/2001, ambos inclusive (115 días consecutivos). Eso es para la coincidencia de tiempo entre datos de la celda y 2 tipos de evaporímetros, disponibles en aquel entonces. La Tabla 2 enseña en detalles todo el monitoreo. Para el cálculo de la última columna se utilizó la ecuación (3). Según Nerilo et al (2002), la máxima intensidad de lluvia en la región fue 424,1 mm h⁻¹, con tiempo de retorno de 100 años y duración 5 minutos, en la vecina Paulo Lopes-SC. Por otro lado, un ensayo de infiltración hecho en el Laboratório de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental de la UFSC, reveló que la arena utilizada para cierre de la celda posee una capacidad máxima de infiltración de 680,0 mm h⁻¹. Es decir, la probabilidad de ocurrir escurrimiento superficial era pequeña. De hecho, no ocurrió (ver Tabla 2). De todas formas, la celda, a principio, fue concebida para manejar escorrentía y ser aplicada a cualquier suelo. Las evaporaciones máxima y mínima resultaron en 3,016 y 0,548 mm dia⁻¹, respectivamente. La media general fue de 0,967 mm dia⁻¹. Se percibe que la evaporación media de un cierto “período”(entre 2 mediciones) es directamente proporcional a la lluvia ocurrida,

pero no es el único fator influyente. A veces, el aumento de la evaporación tras algunas lluvias, no se produce inmediatamente sino que después de 3 o 4 días de retardo. Para una explicación más completa, habria que coleccionar datos de vientos, temperatura, nubosidad, radiación solar y humedad relativa del aire. Hay que dejar muy claro que un monitoreo completo de datos climáticos no fue el objetivo principal del presente estudio. La Figura 3 enseña las evaporaciones medidas en los 115 días de observación para: Celda (el modelo reducido), tanque Clase A y “tanque 1”. Como los datos del tanque Clase A fornecidos por el INMET presentaban algunas fallas, se hizo un relleno con las medias mensuales, mes a mes. Por todo ello, se percibe que algunos pontos tienen exactamente la misma ordenada. El evaporímetro llamado “tanque 1” fue instalado para confirmaciones y contraste entre distintos resultados. Era un cilindro de PVC con 214 mm de diámetro interno y 250 mm de altura dotado de un sistema de medición de niveles. Para mejorar la precisión, se leía el nivel del agua siempre con una lente de 100 mm de diámetro lo que permitia percibir algo como 1/4 de mm. El tanque Clase A más cercano adoptado pertenece a la estación meteorológica “Florianópolis nº 83897”, código 02748006 DNAEE (1996), ubicada en São José-SC, a 15 km de distancia del experimento. Actualmente esta bajo responsabilidad del 8º Distrito de Meteorologia del INMET. Los datos principales de evaporación están enseñados en la Tabla 1 que incluye las simulaciones matemáticas explicadas más adelante. Considerándose el tanque Clase A como base (el 100 %), el “tanque 1” representaria, en promedio, un 62,7 % de la evaporación de superficie líquida libre y, la celda, un 23,6 %.. El tanque Clase A presentó evaporación máxima maximorum de 7,63 mm y, la mínima minimorum de 1,48 mm. Respectivamente, el tanque 1 y celda presentaron: 6,500-0,430 y 2,180-0,548 mm. La relación de áreas entre el los dos evaporímetros es 32. Hay que señalar que el tanque Clase A es de latón y el “tanque 1” es de PVC. Un estudio de la influencia del material del tanque, area, etc, está fuera del actual objetivo. Adelante, la Figura 4 enseña, acumuladamente, los datos de la Figura 3 juntamente con la lluvia ocurrida y 3 sencillos modelos matemáticos a continuación explicados.

Tabla 1 - Datos principales de evaporación

Equipo/Autor	Promedio (mm dia ⁻¹)	Total (mm)	% (relativ)
Celda	0,97	111,3	23,6
Tanque1	2,57	295,7	62,7
Tanque Clase A	4,10	471,1	100,0
Simul. C/Clase A	0,93	107,4	22,8
Simul. C/B.Criddle	2,98	342,5	72,7
Simul. C/Thorntwaite	1,51	173,9	36,9

Tabla 2 - Monitoreo de la celda

N	Tiempo (días)	Fecha y hora		W _i (g)	P (mm)	ESC (mm)	I (mm)	E (mm)	E* (mm)
0	.....	07/Jun	14:40	18295	.....	.....	.....	.....	.....
1	06	13/Jun	15:00	18196	1,124	0,00	1,124	4,474	0,746
2	05	18/Jun	14:45	18542	14,183	0,00	14,183	2,981	0,596
3	04	22/Jun	15:00	18909	16,032	0,00	16,032	4,178	1,044
3 ^A	.....	27/jun	16:00	(-) 1974	.....	.....	.....	.....	.....
4	07	29/Jun	15:00	19280	85,671	0,00	85,671	9,460	1,351
5	05	04/Jul	15:40	19233	1,440	0,00	1,440	3,055	0,611
6	06	10/Jul	16:20	19267	5,414	0,00	5,414	4,425	0,737
6 ^A	.....	23/Jul	09:15	(-) 984	.....	.....	.....	.....	.....
7	13	23/Jul	14:45	19243	56,240	0,00	56,240	25,631	1,972
8	14	06/Ago	14:30	19842	27,969	0,00	27,969	8,762	0,619
9	04	10/Ago	15:20	19756	0,000	0,00	0,000	2,883	0,721
10	06	16/Ago	15:00	19654	0,245	0,00	0,245	3,671	0,612
11	07	23/Ago	16:00	19806	9,569	0,00	9,569	4,741	0,677
11 ^A	.....	30/Ago	14:00	(-) 989	.....	.....	.....	.....	.....
12	07	30/Ago	14:30	18942	9,077	0,00	9,077	5,140	0,734
13	04	03/Set	14:17	19077	8,476	0,00	8,476	4,187	1,047
13 ^A	.....	03/Set	15:30	(+) 73	.....	.....	.....	.....	.....
14	03	06/Set	15:30	19827	28,440	0,00	28,440	6,541	2,180
14 ^A	.....	06/Set	16:20	(+) 73	.....	.....	.....	.....	.....
14 ^B	.....	13/Set	09:50	(-) 1366	.....	.....	.....	.....	.....
15	07	13/Set	10:20	19324	32,715	0,00	32,715	7,148	1,021
16	04	17/Set	15:30	19512	9,983	0,00	9,983	3,960	0,990
17	03	20/Set	15:30	19480	1,281	0,00	1,281	2,389	0,796
18	04	24/Set	14:30	20482	37,011	0,00	37,011	4,458	1,114
18 ^A	.....	01/Out	14:00	(-) 3858	.....	.....	.....	.....	.....
19	07	01/Out	15:30	20488	129,735	0,00	129,735	3,838	0,548
20	03	04/Out	16:40	20373	12,770	0,00	12,770	9,049	3,016
20 ^A	.....	04/Out	16:50	(-) 134	.....	.....	.....	.....	.....
20 ^B	.....	09/Out	15:00	(-) 2240	.....	.....	.....	.....	.....
21	05	09/Out	15:30	19496	57,597	0,00	57,597	9,026	1,805
21 ^A	.....	09/Out	16:50	(+) 38	.....	.....	.....	.....	.....
21 ^B	.....	18/Out	15:00	(-) 444	.....	.....	.....	.....	.....
22	09	18/Out	17:00	19432	21,603	0,00	21,603	10,742	1,193
22 ^A	.....	18/Out	17:45	(+) 3	.....	.....	.....	.....	.....
23	06	24/Out	16:00	20390	40,044	0,00	40,044	9,151	1,525
23 ^A	.....	24/Out	16:15	(-) 1335	.....	.....	.....	.....	.....
24	05	29/Out	14:30	18928	0,00	0,00	0,00	4,257	0,851
25	03	01/Nov	11:30	18870	0,00	0,00	0,00	1,944	0,648
26	05	06/Nov	15:00	18776	0,697	0,00	0,697	4,202	0,840

Simulación

Pareció interesante hacer una sencilla simulación de evaporaciones de suelo desnudo partiéndose de la Eto. Como la estación meteorológica más cercana está alejada 15 km del proyecto, su conjunto total de datos no es muy aplicable. Aparte, la modelación matemática no es aquí

objetivo central. Por todo ello, se utilizarán solamente 3 métodos clásicos para estimar la evapotranspiración potencial que son: Tanque Clase A, Blaney-Criddle y Thornthwaite. Sería interesante aplicar un modelo más sofisticado como, por ejemplo, el de Ritchie (1972) para suelo desnudo pero, como no había pluviógrafo cercano ni

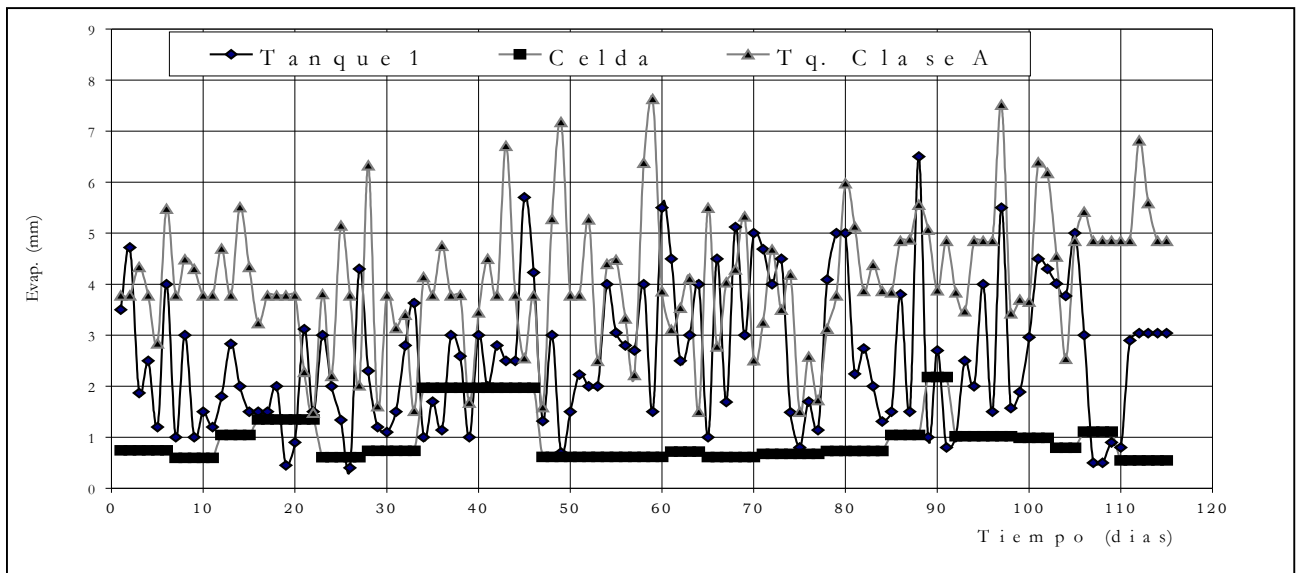


Figura 3 - Evaporaciones de la Celda, tanque 1 y tanque Clase A

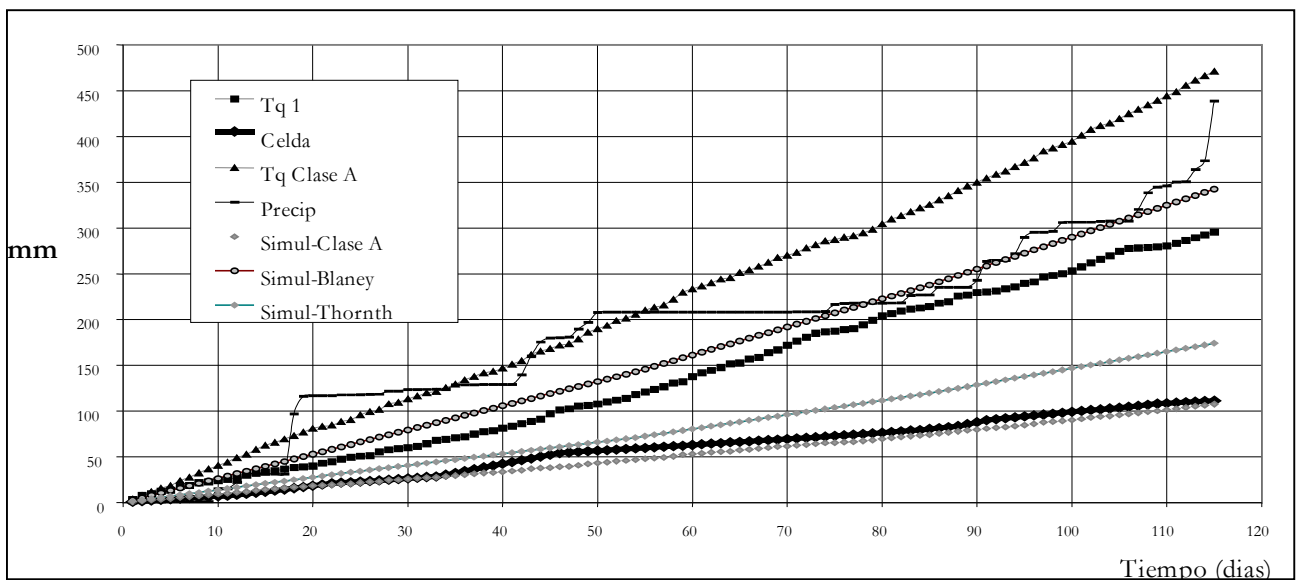


Figura 4 - Lluvia y Evaporaciones acumuladas

datos para identificar las “fases I y II” de la evaporación, se eligió tan solo aquellos 3 comentados. Para simular aproximadamente la evaporación real de suelo desnudo, se puede considerar que en los primeros días después de una sembradura, la evapotranspiración que ocurre es prácticamente la evaporación de dicho suelo desnudo (ver Figura 1). Con el método del tanque, se puede obtener la E_{To} y, después, la E_{TPc} (en este caso = E_S) a través de las ecuaciones (1) y (2). Doorenbos y Pruitt (1977) presentaron

un método aproximado para determinar el coeficiente de tanque Clase A (K_t) en función de las condiciones del suelo en las cercanías del tanque, velocidad del viento, humedad relativa del aire y distancia del tanque hasta el final del césped o suelo desnudo. Para Florianópolis y al época del experimento, se tiene aproximadamente: H.R. 85 %; viento moderado entre 175 y 425 $Km\ día^{-1}$; distancia hasta el borde entre 10 y 100 metros, con césped. Segundo el citado autor, “ K_t ” debería ser aproximada

Tabla 3 - Comparación entre distintos autores

Nº	Autor	Precip Anual (mm)	Rango de temp. (°C)	Suelo	Evaporación diaria (mm día ⁻¹)			Vol. del lisim. (litros)
					Min	Média	Máx	
1	Este trabajo: Tanque “Clase A”	1683	08 / 28	Agua	1,48	4,10	7,63	296,0
2	Este trabajo: Tanque 1	1683	08 / 28	Água	0,40	2,57	6,50	9,0
3	Este trabajo: Celda	1683	08 / 28	Arena gruesa	0,55	0,97	2,18	21,0
4	Este trabajo: Simulación C/ Kt=0,76 y Kc = 0,30	1683	08 / 28	Arena gruesa	0,34	0,93	1,74	296,0
5	Mellouli et al (2000)*** [Tunisia y España]	190	20 / 30	Suelo arenoso	n/d	1,25	N/d	118,0
6	Mellouli et al (2000)*** [Tunisia y España]	280	20 / 30	Suelo arenoso c/ rocas	n /d	0,79	n /d	118,0
7	Menziani et al (1999) [Italia]	718	12 / 28	Arena fina	1,77	2,74	4,60	3141,6
8	Jackson et al (1999) [Kenia]	782	15 / 30	Suelo areno-arcilloso	1,03	1,92	2,80	2,0
9	Mwendera et al (1997) [Belgica]	720	05 / 24	Suelo limoso (lavrado)	0,10	0,64	1,75	5,0 (micro)
10	Mwendera et al (1997) [Belgica]	720	05 / 24	Suelo limoso (lavrado y rejado)	0,10	0,52	1,65	5,0 (micro)
11	Plauborg (1995) [Dinamarca]	600	0 / 15	Suelo arenoso	1,30	1,65	2,00	0,8 (micro)
12	Wallace et al (1999) [Kenia]	782	15 / 35	Suelo areno arcilloso (bajo sombra de árbol)	0,35	0,92	4,60	1,8 (micro)
13	Wallace et al (1999) [Kenia]	782	15 / 35	Suelo areno arcilloso	0,45	1,33	6,10	1,8 (micro)
14	Qiu et al (1998)*** [Japon]	2074	08/ 40	Arena gruesa	0,30	0,97	1,65	18,0 y 78,0
15	Pauliukonis et al (2001) [USA]	1080	16 / 31	Suelo vegetal #	0,40	2,03	3,50	34,3
16	Yuen et al (2001)* [Australia]	874	09 / 23	Arcilla	0,05	1,20	2,27	Relleno real
17	Yuen et al (2001)** [Australia]	874	09 / 23	Arcilla	0,05	0,98	2,40	Relleno Real
18	Daamen et al (1995) [Niger]	540	20 / 40	Arena media	0,43	1,71	3,55	1,8 (micro)

Las máx. y mín. refiérense, respect., a “Fase I” (saturado) y Fase II” (secando). / * calculado con modelo Jensen / ** calc. con modelo H.E.L.P./ *** c/ lluvia artificial / # autor no indica su clasificación / “n/d” ato no disponible/ “micro” micro lisimetro

mente 0,76 como siendo lo más adecuado para el caso de la estación presente. Aquí, se hizo una simplificación considerándose ese coeficiente como constante durante todo el monitoreo. En general en el estadio inicial de una cultura, Kc varia de 0,25 a 0,65. Se adoptó aquí el valor constante Kc = 0,30.

Según Blaney-Criddle

$$E_{to} = a + b [(p (0,46 t + 8)] \quad (4)$$

Para Thornthwaite:

$$ETP = 16 f_c (10 t/I)^c \quad (5)$$

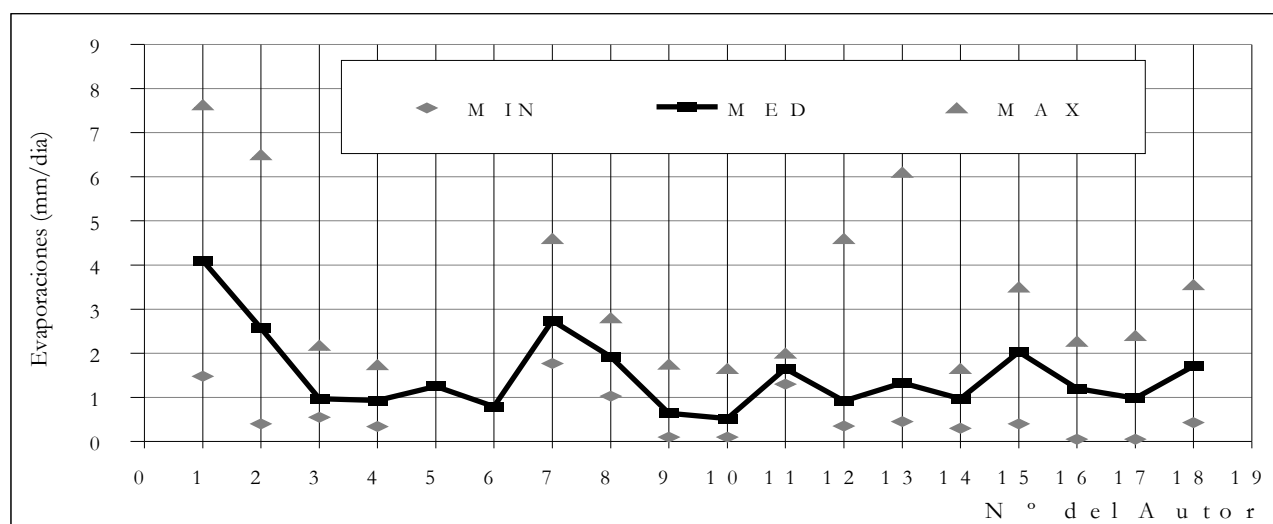


Figura 5 - Contraste con otros autores

$$I_c = \sum_{i=1}^{12} (t_i/5)^{1,514} \quad (6)$$

$$c = 67,5 \cdot 10^{-8} I_c^3 - 7,71 \cdot 10^{-6} I_c^2 + 0,01791 I_c + 0,492 \quad (7)$$

En el primer método (tanque Clase A) el cálculo fue determinado día a día. En los dos últimos, en base mensual pero después considerando una distribución uniforme dentro de cada mes. Las evaporaciones del agua del tanque 1 resultaron prácticamente coincidentes con las mediciones de la celda. La simulación con evapotranspiración potencial de Blaney-Criddle resultó demasíadamente alta pero la de Thornthwaite más aproximada con las observaciones de la celda. La evaporación del tanque Clase A se mostró con una pendiente casi constante ($4,10 \text{ mm día}^{-1}$), sin depender mucho de las lluvias ocurridas. Ya el tanque 1 tuvo comportamiento similar, con menor pendiente y con alguna sensibilidad a más. Quizás por su reducido tamaño.

La Tabla 1 ya presentada incluye los principales resultados.

Comparaciones con otros trabajos

La Tabla 3 presenta un resumen general de resultados de varios autores y La Figura 5, valores máximos, medios y mínimos. En abscisas, se ubicó los distintos trabajos identificados por el número de orden. De todo este artículo, Yuen et al (2001) presentó el mínimo valor con $0,05 \text{ mm día}^{-1}$ y Wallace et al (1999), el máximo, con $6,10 \text{ mm día}^{-1}$. Hay que notar que el primero autor utilizó arcilla y ese último, arena arcillosa. Es decir, cuanto mayor el diámetro, más fácil es la evaporación. Se nota que hay una gran variación en los volúmenes de los lisímetros utilizados. Incluso, se pone de manifiesto la utilización de los “micro-lisímetros” con volúmenes hasta 0,80 litros. La celda del presente artículo tuvo un volumen de 21 litros. La misma Tabla 3 enseña lluvias anuales pero su influencia no pudo ser verificada pues los períodos monitoreados por cada autor varían entre las estaciones. Los rangos de temperatura del aire si muestran tendencia a influir en las evaporaciones tanto medias como máximas. Por ejemplo, el ya citado Wallace et al (1999) en Kenia presentó la máxima evaporación con temperaturas llegando hasta un 35°C . En Dinamarca Plauborg (1995), con temperaturas de 0 a 15°C , presentó media de $1,65$ y máxima de $2,00 \text{ mm día}^{-1}$. Es decir, resultados algo regulares. Por otro lado, como se puede ver, los otros resultados no aclaran esa tendencia. Mellouli et al (2000), Qyu et al (1998) y Yuen et al (2001) contrastaron datos reales con los modelos matemáticos Jensen et al (1971, 1979, 1990) y HELP (Schroeder et al 1994).

CONCLUSIONES

Se presentó aquí una utilización de un pequeño lisímetro portable de pesaje para la medición de evaporación real de suelo desnudo no saturado de la cobertura arenosa de un modelo reducido de relleno sanitario. La camada de basura abajo del suelo no pareció influir de manera significativa en los resultados que se presentan bien ubicados dentro del rango de resultados de otros trabajos sin la dicha basura. La balanza utilizada tuvo la

capacidad máxima de 50 kg y sensibilidad de 2,0 gramos. Como el peso de la celda varió aproximadamente en el rango de 18 a 21 Kg, la precisión média fue de 0,01 % considerada excelente.

RECOMENDACIONES

Considerando la carga máxima de la balanza utilizada y su excelente precisión, se puede aumentar el tamaño de la celda y disminuir un poco los períodos de tiempo entre dos mediciones consecutivas. Así, los resultados tendrán un ajuste fino casi a diario y serán más representativos de la realidad de los rellenos sanitarios.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al PROSAB III - Programa de Saneamiento Básico y al Laboratório de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Sanitária y Ambiental de la UFSC donde se realizó el diseño, utilizó materiales y se construyó el aparato. Por último, al prof. Marciano Maccarini del Depto de Ingeniería Civil de la UFSC por la utilización de una excelente balanza electrónica de precisión.

REFERENCIAS

- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W.D. (1950) Determining Water Needs From Climatological Data. USDA, SCS / SOS-PT, pp8-9.
- CAPELO NETO, J.; MOTA, S.; SILVA, F.J.A. da (1999). Geração de Percolado em Aterro Sanitário no Semi-árido Nordeste: uma Abordagem Quantitativa, R. E. S.e Ambiental, V. 4, n° 3, 160-167, Rio de Janeiro.
- DAAMEN, C.C.; SIMMONDS, L.P.; SIVAKUMAR, M.V.K. (1995) The impact of sparse millet crops on evaporation from soil in semi-arid Niger. *Agricultural Water Management*, 27(1995)225-242.
- DOORENBOS, J.; PRUITT (1977). Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. *FAO Irrig. Drain. Papern° 24*, p 1-179.
- FENN, D.G., HANLEY, K.J., DeGEORE, T. V. (1975). Use of Water Balance Method for Predicting Leachate Generation for Solid Waste Disposition Sites, EPA Report n° EPA/530/SW 168, Cincinnati.
- FUNGAROLI, A. A., STEINER, R.L. (1971); Laboratory Study of the Behavior of a Sanitary Landfill, *Journal of the WPCF*, v. 43, n° 2, Feb., p 252-267.
- GEE, J.R. (1981), Prediction of Leachate Accumulation in Sanitary Landfills, *Applied Research & Practice on Municipal and Industrial Waste*, 4 Conf. Madison.
- HARGREAVES, G. H. (1994) Defining and Using Reference Evapotranspiration, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 120, p.1132-9.
- JACKSON, N. A.; WALLACE, J.S. (1999), Soil Evaporation Measurements in an Agroforestry System in Kenia, *Agricultural and Forest Meteorology* 94 (1999)203-215.
- JENSEN, M.E; ROBB, D.C.N.; FRANZOI, C. E. (1970), Scheduling Irrigation Using Climate-Crop-Soil Data, *J. Irrig. Drain. Div. Proc. ASCE*- 96 (IR2), 25-38.
- JENSEN, M.E; WRIGHT; J.L.; PRATT, B. L. (1971), Estimating Soil Moisture Depletion from Climate, Crop and Soil Data. *Tr. Am. S. Agr. Eng* 14(5), 954-959.
- JENSEN, M.E; BURMAN, R. D.; ALLEN, R.G. (1990), Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements, *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice* no. 70, ASCE.
- JENSEN, M.E.; HAISE, H.R. (1963). Estimation of Evapotranspiration from Solar Radiation. *J. Irrig. Drain. Div.*, v89, p.15-41.
- JENSEN, M.E. (1980) Design and Operation of Farm Irrigation Systems. A .S.A .E., St. Joseph.
- MAURER, R. W. (1994), A paradigm shift from storage to bioreactors. *Proc. Conf. "Landfill Tomorrow"*, Center of ECWM, I. College, London, pp. 1-5.
- MEDEIROS, P. A.; CASTILHOS Jr. A. B. de; OLIVEIRA, J.C.S.; SOARES, S.R (2002), Geração de Líquidos Percolados em Resíduos com Cobertura Permeável, *VIS. Ítalo/Bras. de Eng. S.e Amb., Vitória*.
- MEDEIROS, P. A.; SILVA, J. D. da; CASTILHOS Jr, A. B. de (2002), Balanço Hídrico em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos – Escala Experimental de Laboratório, in: *Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para Pequenas Comunidades- Coletânea de Trabalhos Técnicos*, Castilhos Jr. A. B. de; Lange, L.C.; Gomes, L. P.; Pessin, N. (organizadores), PROSAB 3, Florianópolis.
- MEDEIROS, P. A.; CASTILHOS Jr, A. B. de.; SILVA, J.D. da; DELAZARI, P.V. A. (2002), Monitorio del Balance Hídrico en Basura Domiciliaria Urbana, III Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental / Gestão Ambiental Urbana e Industrial, Pôrto Alegre.
- MELLOULI, H.J.; WESEMAEL B. V.; POESEN, J.; HARTMANN, R. (2000); Evaporation Losses From Bare Soil as Influenced by Cultivation Techniques in Semi-Arid Regions. *Agricultural Water Management*, 42(2000)355-369.
- MENZIANI, M.; PUGNAGHI S.; PILAN, L. SANTANGELO, R.; VINCENZI S. (1999). Field Experimentation to Study Evaporation from a Saturated Bare Soil. *Phys. Chem. Earth (B)*, vol. 24, no.7, pp 813-818.
- MWENDERA, E.J. FEYEN, J. (1997). Tillage and Evaporativity Effects on the Drying Characteristics of a Silty Loam: Evaporation Prediction Models. *Soil and Tillage Research* 41 (1997) 127-140.
- NERILO, N.; MEDEIROS, P. A., CORDERO, A. (2002), *Chuvas Intensas no Estado de Santa Catarina*, Editora da UFSC / EdFURB, 156 p. Florianópolis,

- PAULIUKONIS, N.; SCHNEIDER, R. (2001) Temporal Patterns in Evapotranspiration from lysimeters with three Common Wetland Plant Species in the Eastern USA, *Aquatic Botany*, 71(2001)35-46.
- PENMAN, H.L.(1948). Natural Evaporation From Open Water, Soil and Grass. *Proc. Royal Society. Ser. A*, n. 193
- PLAUBORG, F. (1995); Evaporation From Bare Soil in a Temperate Humid Climate-Measurement Using Micro-Lysimeters and Time Domain Reflectometry, *Agricultural and Forest Meteorology* 76 (1995)1-17.
- QIU, G. Y.; YANO, T.; MOMII, K. (1998). An Improved Methodology to Measure Evaporation from Bare Soil Based on Comparison of Surface Temperature with a Dry Soil Surface. *Journal of Hydrology*. 210(1998) 93-105.
- RICHIE, J. T. (1972) Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *W.Res.* 8.
- SCHROEDER, P. R.; DOZIER, T.S.; ZAPPI, P.A. : Mc ENROE, B. M. ; SJOSTROM, J. W. , PEYTON, R.L.(1994), The (HELP) Model: Eng Doc.for Vers 3 (EPA/600/R-94/168b)PA/ORD, Washington, DC.
- THORNTHWAITE, C. W.; HOLZMAN, B. (1939) The Determination of Evaporation from Land and Water Surfaces. *Monthly Weather Review*, v.67 p 4 – 11.
- TUCCI, C. E. M.(1993), (org.), *Hidrologia- Ciência e Aplicação*, , UFRGS, EDUSP, ABRH, Pôrto Alegre.
- WALLACE, J.S.; JACKSON, N. A.; (1999), ONG, C.K. Modeling Soil Evaporation in na Agroforestry System in Kenia., *Agricultural and Forest Meteorology* 94 (1999)184-202.

Cell for Monitoring Actual Unsaturated Bare Soil Evaporation .

ABSTRACT

This paper deals with unsaturated bare soil evaporation and complements previous laboratory research on water balance of domestic solid waste sanitary landfills. A portable small cell was designed and developed specifically to measure that evaporation through successive weightings utilizing a digital scale while water evaporation was monitored through a small evaporimeter tank. The results obtained from both devices were compared to nearest Class A tank historical data series. Evaporation was also calculated through three simple mathematical simulations using suitable tank and first stage crop coefficients. A literature comprehensive search enabled a general comparison of the results under many climates. Despite its low cost, the portable cell delivered satisfactory performance.

Key-Words: bare soil evaporation; physical models; lysimeters.