

## CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE MODELOS EMPÍRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN EN VENEZUELA<sup>1</sup>

### CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF EMPIRICAL MODELS FOR THE ESTIMATION OF THE EVAPORATION IN VENEZUELA<sup>1</sup>

Raquel M. Parra\*, Adriana Cortez\*, María F. Rodríguez\*, Juan C. Rey\*, Francisco Ovalles\* y Walter González\*

<sup>1</sup> Trabajo financiado por el INIA en la Programación Ordinaria ID-ARA-05-00204 y FONACIT en el Proyecto S1-200200417, S1-200500195.

\* Investigadores. INIA. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CENIAP). Recursos Agroecológicos. Apdo. Postal 4846, Maracay 2101, estado Aragua, Venezuela. Web: [www.inia.gob.ve](http://www.inia.gob.ve); [www.ceniap.gob.ve](http://www.ceniap.gob.ve). E-mail: [rparra@inia.gob.ve](mailto:rparra@inia.gob.ve)

#### RESUMEN

La evaporación es un elemento importante en cualquier estudio del balance. Su medición puede realizarse directa o indirectamente, basándose esta última en las relaciones existentes entre esta variable y otros elementos meteorológicos y espaciales (latitud, longitud y altitud). El objetivo de este estudio es analizar las relaciones e influencia de las variables meteorológicas y espaciales sobre el comportamiento de la variabilidad de la evaporación en Venezuela y la construcción de modelos empíricos lineales que permitan su estimación. Se encontró que la variable evaporación de tina tiene asociaciones lineales significativas con las variables meteorológicas radiación, insolación, temperatura máxima, temperatura media y humedad relativa en casi todas las regiones del país. Las diferencias en términos absolutos entre los valores observados y estimados estuvieron entre 0 y 65 mm. Para términos prácticos las ecuaciones representan una buena aproximación a la estimación de los montos de evaporación mensual y por ende permiten generar análisis más certeros sobre el comportamiento de la variable en Venezuela.

**Palabras Clave:** Evaporación; modelos de estimación; correlación; regresión múltiple.

#### SUMMARY

The evaporation is an important element in any study of the hydric balance. Its measurement can be made of directly or indirectly form, being based this last on the existing relations between this variable and other meteorological and spatial elements (latitude, length and altitude). The objective of this study is to analyze the relations and influences of the meteorological and spatial variables on the behavior of the evaporation variability in Venezuela and the construction of linear empirical models to allow its estimation. It has been found that the variable pan evaporation has significant linear associations with the meteorological variables radiation, sunshine, temperature and relative humidity in almost all the regions of the country. The differences in absolute terms between the observed and estimated values were between 0 and 65 mm per year. For practical purposes the equations represent a good approach for the estimation of monthly evaporation and therefore they allow to generate more accurate analyses on evaporation variability in Venezuela.

**Key Words:** Evaporation; estimation model; correlation; multiple regression.

## INTRODUCCIÓN

La evaporación es un elemento importante en cualquier estudio del balance hídrico y puede ser decisiva en la determinación de la factibilidad de construcción y operación de un embalse para un sitio determinado. Para su medición existen métodos directos entre los cuales la tina tipo A es la más comúnmente utilizada en las estaciones climatológicas; otro tipo de medición de la evaporación son los métodos indirectos que se basan en las relaciones existentes entre esta variable y otros elementos meteorológicos y espaciales (latitud, longitud y altitud).

El objetivo de este estudio es analizar las relaciones e influencia de las variables meteorológicas y espaciales sobre el comportamiento de la evaporación en Venezuela y la construcción de modelos empíricos lineales que permitan su estimación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los datos de evaporación (mm) de 219 estaciones pertenecientes a: INIA, CVG-EDELCA, MPPA (Ambiente) y Agronomía-UCV, comprendidos dentro del período 1970-2000, de las cuales 69 estaciones (tipo SB, C1 y C2) fueron utilizadas para estudiar las relaciones entre la evaporación observada y las variables meteorológicas (radiación, heliofanía o insolación, temperatura y humedad relativa) y espaciales.

Donde primero se procedió al análisis por regionalización según áreas naturales establecidas por Rodríguez *et al.* (2006) que engloben patrones climáticos más o menos uniformes.

Se construyeron matrices multivariadas de correlaciones lineales entre los elementos meteorológicos y espaciales y se seleccionaron las variables pertinentes según el coeficiente de correlación de Pearson calculado como  $r = \text{Cov}(X, Y) / S_x S_y$ , donde  $\text{Cov}(X, Y)$  es la medida de la covarianza entre dos variables  $X$  e  $Y$  y  $S_x$  y  $S_y$  son sus respectivas desviaciones típicas (Gujarati, 2000). Se construyeron todos los posibles modelos lineales reducidos (sin intercepto)  $\hat{Y}_i = \hat{\beta}_1 X_{i1} + \hat{\beta}_2 X_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ik} = \hat{\beta}_j X_{ij}$  entre las variables consideradas para estimar evaporación mensual por región, donde  $X_{ij}$  son las  $j$  variables predictoras o explicativas del comportamiento de la evaporación y  $\hat{\beta}_j$  son los  $j$  coeficientes de estimación para los  $j$  variables explicativas. Posteriormente se eligieron según los criterios utilizados por Draper y Smith

(1998) para la selección del modelo apropiado a aquellos que presentaran menor Raíz del Cuadrado Medio del Error (RCME), mayor Coeficiente de Determinación Ajustado ( $R^2_{\text{ajust}}$ ), valores de Residuales entre -3 y 3 y menor Error Estándar para los coeficientes estimados.

Finalmente y para evaluar el ajuste de los modelos seleccionados se compararon los valores de evaporación anual observados con sus respectivos valores estimados promedios y se generó un mapa de las dispersiones de estas diferencias haciendo uso de la interpolación por Kriging con Surfer v. 8.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontró que la variable evaporación de tina tiene asociaciones lineales significativas positivas con las variables meteorológicas radiación, heliofanía, temperatura máxima y temperatura media, y negativa con la humedad relativa, repitiéndose este patrón para casi todas las regiones. Las variables latitud, longitud y altitud fueron especialmente consideradas en las regiones Central, Central+Capital, Centro Occidental y Guayana con el fin de mejorar el ajuste de los modelos (Figura 1).

En el Cuadro 1 se observan los coeficientes de regresión de los modelos lineales múltiples sin intercepto  $\hat{Y}_i = \hat{\beta}_1 X_{i1} + \hat{\beta}_2 X_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ik}$  para estimar la evaporación mensual por región. En el caso de la Región Central se seleccionaron dos modelos: el primero denominado Central estima con buen ajuste los valores de evaporación mensual para los estados Carabobo y Aragua a altitudes menores a los 600 m.s.n.m., el segundo denominado Central+Capital se vale de puntos de observación ubicados en la Región Capital por encima de los 600 m.s.n.m., para lograr el ajuste de la estimación de evaporación de los estados Carabobo y Aragua que se encuentren por encima de este nivel.

Los modelos de estimación tuvieron coeficientes de determinación ajustados ( $R^2_{\text{ajust}}$ ) por encima del 87%. Los modelos de las regiones Central+Capital y Los Llanos fueron las que presentaron mayor error de estimación con raíz del CME alrededor de los 20 mm mensuales. Todas las pruebas de F en el análisis de regresión resultaron altamente significativas ( $P < 0,0001$ ) como se aprecia en el Cuadro 2. Cabe destacar que en la región Insular la radiación por sí sola explica más del 99% de la variabilidad de la evaporación por lo que se consideró suficiente un modelo lineal simple.

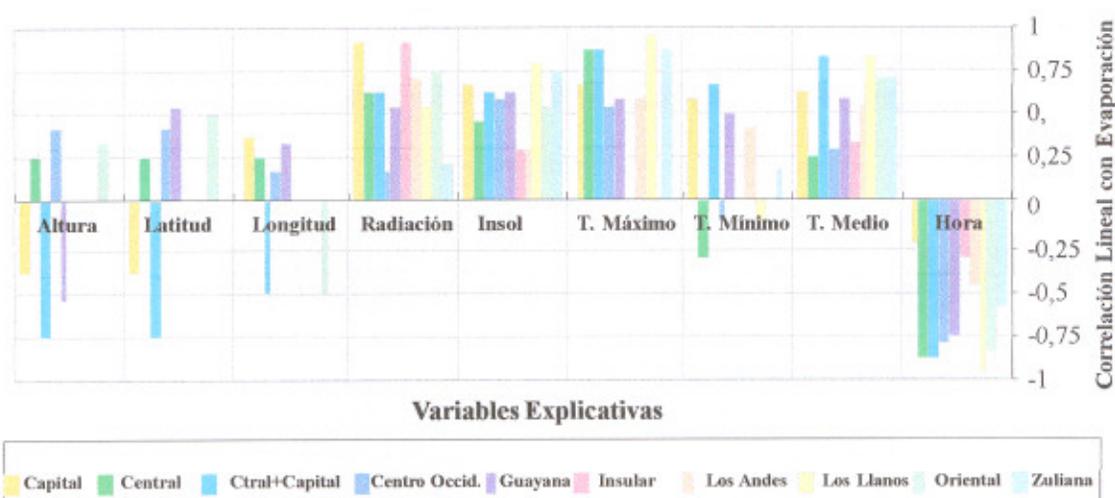


FIGURA 1. Correlaciones lineales simples de la evaporación mensual con las otras variables geográficas y climáticas.

CUADRO 1. Coeficientes de regresión de los modelos  $\hat{Y}_i = \hat{\beta}_1 X_{1i} + \hat{\beta}_2 X_{2i} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ki}$ ; lineales múltiples sin intercepto para estimar evaporación mensual por region.

Región	Altitud	Latitud	Longitud	Radiación	Insol.	T. Máxi	T. Medio	Hora
<b>Capital</b>				6,5		5,1		-1,7
Error Estandar				0,4799		0,2543		0,5169
Prob> t				<,0001		<,0001		<,0001
<b>Central</b>	-0,7	232,0	38,8	7,7		18,8		
Error Estandar	0,1246	67,3486	9,1918	1,9610		2,2710		
Prob> t	<,0001	0,0017	0,0002	0,0004		<,0001		
<b>Ctral+Capital</b>	0,021				12,4		9,2	-2,2
Error Estandar	0,0048				1,8983		0,8075	0,2064
Prob> t	<,0001				<,0001		<,0001	<,0001
<b>Centro Occ.</b>		39,2				3,6		-4,4
Error Estandar		2,7289				0,6034		0,2550
Prob> t		<,0001				<,0001		<,0001
<b>Guayana</b>	0,050	15,3				10,0		-3,8
Error Estandar	0,0065	1,8954				0,6658		0,3052
Prob> t	<,0001	<,0001				<,0001		<,0001
<b>Insular</b>				14,9				
Error Estandar				0,2196				
Prob> t				<,0001				
<b>Los Andes</b>				5,6			2,9	-0,5
Error Estandar				0,3438			0,4878	0,1348
Prob> t				<,0001			<,0001	<,00015

... continúa

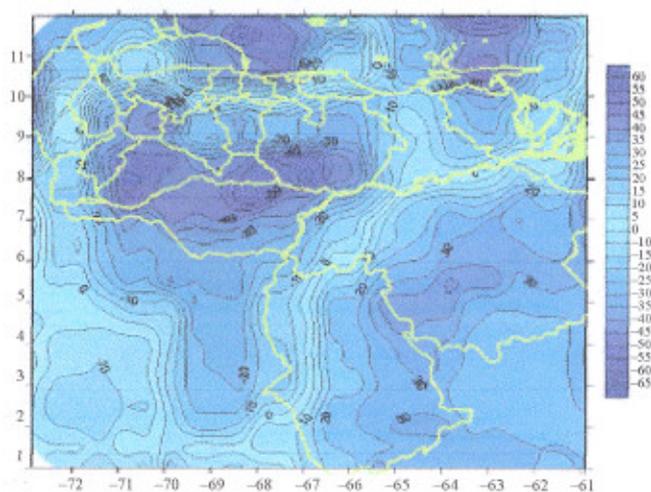
... Continuación Cuadro 1.

Región	Altitud	Latitud	Longitud	Radiación	Insol.	T. Máxi	T. Medio	Hora
<b>Los Llanos</b>					<b>9,0</b>		<b>14,7</b>	<b>-3,6</b>
Error Estandar					1,4310		0,7341	0,1872
Prob> t					<,0001		<,0001	<,0001
<b>Oriental</b>				<b>8,2</b>			<b>9,4</b>	<b>-2,7</b>
Error Estandar				2,0246			1,7125	0,3213
Prob> t				0,0003			<,0001	<,0001
<b>Zuliana</b>					<b>6,8</b>		<b>14,4</b>	<b>-3,6</b>
Error Estandar					1,7932		0,7436	0,2003
Prob> t					0,0005		<,0001	<,0001

**CUADRO 2.** Modelos lineales múltiples sin intercepto ( $\hat{Y}_i = \hat{\beta}_1 X_{1i} + \hat{\beta}_2 X_{2i} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ki}$ ) para estimar evaporación mensual por región.

Región	Raíz CME	Rcuad. Ajust	Media	Prob >F
Capital	6,217986	0,9968	106,8334	<,0001
Central	9,320169	0,8732	154,6511	<,0001
Ctral+Cap.	20,50953	0,9816	144,6027	<,0001
Cntro Occ.	12,57318	0,9938	154,4627	<,0001
Guayana	14,31711	0,9925	154,4627	<,0001
Insular	14,06908	0,9976	273,5967	<,0001
Los Andes	10,55294	0,9887	96,56923	<,0001
Los Llanos	20,9771	0,9888	189,228	<,0001
Oriental	12,54921	0,9950	172,2659	<,0001
Zuliana	9,950796	0,9969	172,7497	<,0001

Tal y como se aprecia en la Figura 2 las diferencias entre los valores observados y estimados estuvieron entre 0 y 65 mm anuales (en términos absolutos) observándose los mayores errores de estimación en las regiones de Los Llanos, Los Andes y norte de las regiones Capital y Oriental.



**FIGURA 2.** Mapa de errores (mm) entre valores de evaporación mensual observados y estimados, interpolado con Kriging (Surfer v. 8).

## CONCLUSIONES

- En Venezuela las variables que más influyen en el comportamiento de la evaporación mensual de tina son radiación, heliofanía, temperatura máxima, temperatura media y humedad relativa.
- Las variables latitud, longitud y altitud fueron consideradas en los modelos de estimación de las regiones Central, Centro Occidental y Guayana por considerarse que contribuyen a mejorar el ajuste del

mismo. En la región Insular la radiación por sí sola explica más del 99% de la variabilidad de la evaporación por lo que se consideró suficiente un modelo lineal simple.

- Las diferencias en términos absolutos entre los valores observados y estimados a través de los modelos lineales no excedieron los 65 mm anuales por lo que se considera que para términos prácticos las ecuaciones representan una buena aproximación a la estimación de los montos de evaporación mensual y por ende permiten generar análisis más certeros sobre el comportamiento de la variable en Venezuela.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Draper, N. and H. Smith. 1998. Applied Regression Analysis, 3<sup>a</sup> ed. John Wiley, New York. 706 p.
- Gujarati, D. 2000. Econometría. McGraw-Hill. 3<sup>a</sup> ed., México. 824 p.
- Rodríguez, M. F., A. Cortez, M. C. Nuñez, F. Ovalles y J. C. Rey. 2006. Distribución espacial de las redes de estaciones meteorológicas en Venezuela. INIA Divulga N° 8.