



## JORNADAS DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA 2010

### ANÁLISIS DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS MEDIANTE DEFLECTOMETRÍA DE IMPACTO (FWD) EN DIFERENTES ÉPOCAS DEL AÑO EN COSTA RICA

**Ing. Gustavo A. Badilla Vargas**

*Unidad de Investigación en Infraestructura Vial(UI)  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,  
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica  
Tel: (506) 2511-4994  
E-mail: [gustavo.badilla@ucr.ac.cr](mailto:gustavo.badilla@ucr.ac.cr)*

**Ing. Denia Sibaja Obando**

*Unidad de Investigación en Infraestructura Vial(UI)  
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales  
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,  
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica  
E-mail: [desiba@ice.go.cr](mailto:desiba@ice.go.cr)*

#### RESUMEN:

El LanammeUCR realiza cada dos años una Evaluación de la Red Vial Nacional (ERVN) pavimentada la cual sirve como instrumento para la gestión de dicha infraestructura. Tomando en cuenta que los datos de deflectometría de impacto (FWD) podría realizarse en diferentes épocas del año, se plantea la necesidad de cuantificar la variación de los resultados producto de los cambios de humedad de las capas granulares y suelos, relacionado con la estación climática.

Para verificar la existencia de variaciones en la respuesta estructural, reflejada en la deflexión en el primer sensor del FWD, asociado con la estación climática (lluviosa y seca), se realizó un análisis estadístico a la base de datos de resultados de FWD recopilados en 32 puntos diferentes en campañas de medición realizadas en diferentes épocas entre el 2003 y el 2006 en 6 regiones geográficas del país.

Los resultados muestran que las estructuras sometidas a cambios marcados del contenido de humedad presentan variaciones significativas en la respuesta. Por el contrario, las zonas en las cuales no existen cambios importantes en el contenido de humedad (más de 180 días de lluvia en el año) no presentan diferencias significativas entre los resultados.

#### ABSTRACT:

Every two years, the LanammeUCR carries out an Evaluation of the National Paved Road Network which is a tool to the Asset Management.



It taking account that the Falling Weight Deflectometer Test (FWD) could carry out in different times of year, it is necessary to quantify the variations of the results by changes of humidity on granular or soils layers associated with the seasonal variation.

To prove the existence of structural response variations, reflected in the value of the first sensor's FWD, associated with the climatic season (dry and rainy), a statistical analysis was made. A database of FWD results from 32 different points located in 6 geographic zones around country was used it. For each point was made measurements in different times between 2003 and 2006.

The result shows that the pavements with significant changes of content of humidity have significant variations of structural response. On the other hand, the zones with insignificant changes of content of humidity (more of 180 rainy days on the year) doesn't show changes significant of the results.

### **PALABRAS CLAVES:**

Deflectometría de Impacto, Zonificación Climática, Respuesta Estructural de Pavimentos.

### **OBJETIVO GENERAL**

Cuantificar la variación en la respuesta estructural del pavimento, reflejada con la medición del primer sensor de deflexión (D1) ubicado en el centro del plato de aplicación de carga del Deflectómetro de Impacto (FWD); con respecto a la época del año en la que se realiza el ensayo a través de un análisis estadístico de estos parámetros.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Tabular la información de evaluaciones para los 32 puntos que comprende el estudio con el deflectómetro de impacto.
- Ubicar y clasificar los 32 puntos que comprende el estudio según la zona climática
- Asociar los meses en los que se realizaron las evaluaciones con el deflectómetro de impacto, con los meses característicos de las dos estaciones (seca y lluviosa) definidas para cada zona climática del país.
- Analizar estadísticamente la variación en la respuesta estructural del pavimento, medida con el D1 en el deflectómetro de impacto, respecto a la época del año en que se realiza el ensayo.

### **ALCANCE**

Para la realización de este estudio se cuenta con las mediciones del D1 (deflexión medida bajo el centro del plato de carga del deflectómetro de impacto) de 32 diferentes puntos localizados en 6 regiones geográficas y en 11 zonas climáticas del país, para los cuales se conoce la estructura del pavimento (espesores) y materiales que los conforman.

El estudio comprende la comparación de la deflexión D1 obtenida mediante el deflectómetro de impacto, como medida indirecta del efecto de reducción producto de la humedad en la que se encuentran las capas granulares y suelos.

El análisis de la variación estacional fue verificada para aquellos puntos en los que se realizaron mediciones en las distintas estaciones climáticas en el año; ya que de lo contrario no sería posible evaluar la influencia de la variación de la humedad en la respuesta estructural del pavimento.

Se reconoce que la estructura del pavimento influye directamente en su respuesta estructural; estructuras “robustas” (de mayores espesores y módulos resilientes altos) presentarán deflexiones menores.

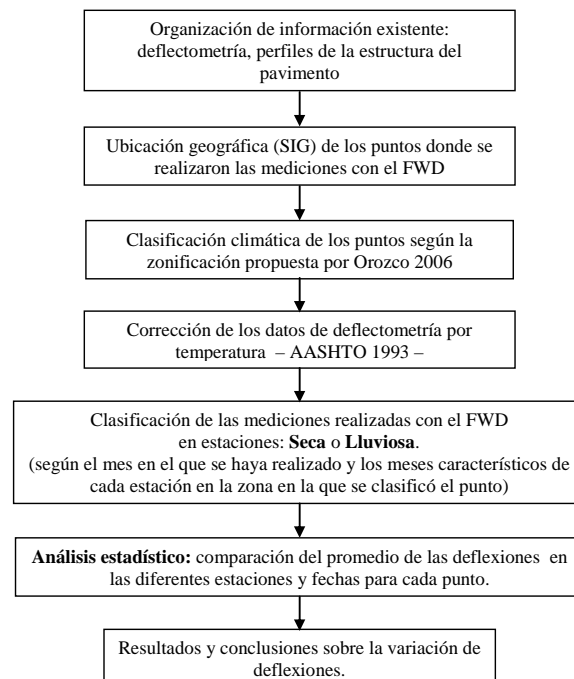
Se considerará en este estudio el espesor de la carpeta asfáltica, el cuál se toma en cuenta para realizar los cálculos necesarios para corregir los datos de deflectometría por temperatura.

El método utilizado, para realizar la corrección por temperatura es el propuesto por el “Asphalt Institute” y la guía de diseño “AASHTO 1993” el cual toma en cuenta: el espesor de la carpeta, la temperatura de la superficie y la del aire.

Para definir si existe variación en los valores de las deflexiones medidas en diferentes estaciones climáticas, se emplearán herramientas estadísticas para comparar los promedios de las deflexiones medidas cada 10 m con el sensor D1, en un tramo de 220 m para cada punto de análisis, distribuidos en las distintas regiones del país y ubicados cerca de estaciones meteorológicas.

## METODOLOGÍA

Para realizar esta investigación se procedió a seguir el esquema que se presenta en la Figura 1, que se muestra a continuación:



**Figura 1.-** Metodología utilizada. Fuente: (los Autores)

## UBICACIÓN DE PUNTOS EVALUADOS CON EL DEFLECTÓMETRO DE IMPACTO

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), cuenta con una base de datos de resultados del deflectómetro de impacto (FWD)



recopilados en 32 puntos localizados en 6 regiones geográficas del país, en los cuales se realizaron diferentes campañas de medición, en diferentes épocas, entre el 2003 y el 2006.

Para cada uno de los puntos seleccionados, se realizó una excavación a cielo abierto para determinar los espesores de cada una de las capas, además se realizaron ensayos de laboratorio a los materiales constituyentes. La metodología de medición consistió en hacer ensayos con el deflectómetro de impacto (FWD) cada 10 m. Estos ensayos se hicieron 120 metros antes y 120 metros después del punto donde se realizó la excavación. Para los materiales de la base, subbase y subrasante se hicieron ensayos de: Próctor (estándar y modificado), límites de Atterberg, granulometrías, CBR. Como primer paso se procedió a realizar la ubicación geográfica de los 32 puntos y posteriormente asignarle las características climáticas correspondientes a la zonificación climática propuesta por Orozco en 2006. En la Tabla 1 se presenta un resumen de la zonificación climática propuesta para Costa Rica, así como los meses característicos para cada estación por zona climática.

**Tabla 1.- Zonas climáticas de Costa Rica y meses característicos**

Zona	Símbolo	Época seca	Época de Transición	Época lluviosa
Caribe	C		setiembre	marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero
Caribe Alta	CA		setiembre	marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero
Cordillera Guanacaste - Tilarán	CGT	enero, febrero, marzo	abril, diciembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre
Caribe Sur	CS		marzo, setiembre	abril, mayo, junio, julio, agosto, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero
Golfo Nicoya - Llanura Guanacaste	GNG	diciembre, enero, febrero, marzo	abril, noviembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre
Los Santos - Caribe Alta	LS	diciembre, enero, febrero, marzo	abril, noviembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre
Norte	N	-	marzo	abril, mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero
Norte Alta	NA	marzo	febrero, abril	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre, diciembre, enero
Pacífico Central	PC	enero, febrero, marzo	abril, diciembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre
Península de Nicoya	PN	diciembre, enero, febrero, marzo	abril, noviembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre
Pacífico Sur	PS	enero, febrero, marzo	abril	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre, diciembre
Talamanca	T	enero, febrero, marzo	diciembre	abril, mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre
Upala-Los Chiles	UC	enero, febrero, marzo, abril	diciembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre
Valle Central	VC	diciembre, enero, febrero, marzo, abril	finales abril, principio noviembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre
Volcánica Central Pacífico	VCP	enero, febrero, marzo	abril, diciembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre
Valle del General	VG	enero, febrero, marzo	abril, diciembre	mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre

*Fuente: (los Autores)*

Para realizar el análisis de los datos se consideró que la condición predominante para los meses de transición era la correspondiente a la estación inmediatamente anterior. Por ejemplo en el caso de la Zona Climática CGT, se tiene que abril es el mes de transición de la estación seca a la lluviosa, por lo tanto se considera para el análisis, que abril conserva las características de la estación seca. Por otro lado diciembre, es el mes de transición de la estación lluviosa a la seca, por lo tanto se considera que diciembre conserva las características de la estación lluviosa.

En la Figura 2, se muestra la ubicación de los puntos en las distintas zonas climáticas. Con base en la Figura 2 y la Tabla 1 es posible definir la estación seca y la estación lluviosa en la que fueron tomados los datos de deflectometría para cada uno de los puntos, el resumen se presenta en la Tabla 2.



Como se puede observar en la Tabla 1 es de esperar que para algunas zonas, a pesar de que se realicen mediciones en distintos meses del año, como se observa en la Tabla 2, todas las mediciones correspondan a meses lluviosos. Esto se debe a que en algunas de estas regiones la época lluviosa comprende la totalidad del año o un gran porcentaje del mismo.

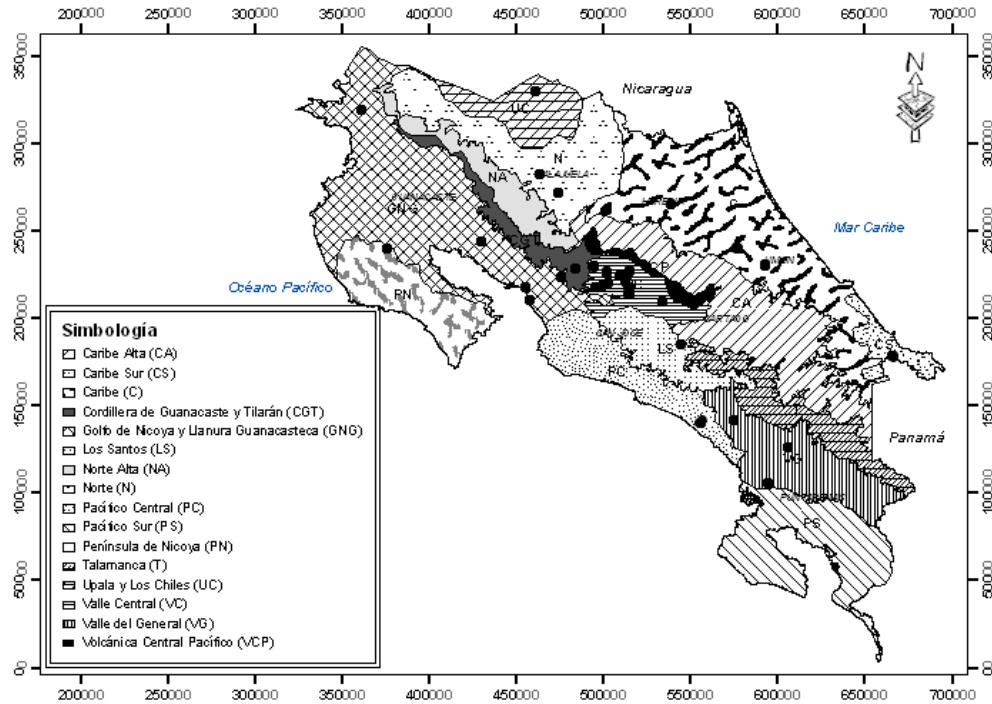


Figura 2.- Ubicación de puntos para las zonas climáticas definidas por Orozco 2007. Fuente: (los Autores)

Tabla 2. - Resumen de mediciones realizadas con el FWD

Punto	Fechas FWD	Estación	Región Climática
Punto 1 Monterrey - Jicarito	21-10-03	Lluviosa	Norte
	20-01-04	Lluviosa	
	20-10-04	Lluviosa	
	25-01-05	Lluviosa	
	25-07-06*	Lluviosa	
Punto 2 Aguas Zarcas - Venecia	22-10-03	Lluviosa	Caribe
	21-01-04	Lluviosa	
	19-10-04	Lluviosa	
	24-01-05	Lluviosa	
Punto 3 Tanque - Florencia	22-10-03	Lluviosa	Norte
	20-01-04	Lluviosa	
	20-10-04	Lluviosa	
	25-01-05	Lluviosa	
Punto 4 Ciudad Quesada - Los Chiles	22-10-03	Lluviosa	Upala - Los Chiles
	21-01-04	Seca	
	19-10-04	Lluviosa	
	24-01-05	Seca	
	24-07-06*	Lluviosa	
Punto 5 Cerro de la Muerte -	03-11-04	Lluviosa	Los Santos
	22-04-05	Seca	
	07-08-06*	Lluviosa	
	10-10-03	Lluviosa	
Punto 6 Barú - Dominical	02-11-04	Lluviosa	Pacífico Central
	07-04-05	Seca	
	07-08-06*	Lluviosa	
Punto 7 Juntas Pactar - San Isidro	10-10-03	Lluviosa	Valle del General
	03-11-04	Lluviosa	
	08-04-05	Seca	
	08-08-06*	Lluviosa	
Punto 8 Buenos Aires - Juntas	10-10-03	Lluviosa	Valle del General
	02-11-04	Lluviosa	
	07-04-05	Seca	
	08-08-06*	Lluviosa	
Punto 9 Río Claro - Palmar Norte	10-10-03	Lluviosa	Valle del General
	02-11-04	Lluviosa	
	07-04-05	Seca	
	07-08-06*	Lluviosa	



**Tabla 2 (continuación).- Resumen de mediciones realizadas con el FWD**

Punto	Fechas FWD	Estación	Región Climática	Punto	Fechas FWD	Estación	Región Climática
Punto 10 Guápiles Sarapiquí -	27-01-04	Lluviosa	Caribe	Punto 20 San Rafael - San Antonio	08-08-02	Lluviosa	Valle Central
	22-10-04	Lluviosa			14-10-04	Lluviosa	
	02-02-05	Lluviosa			18-05-05	Lluviosa	
	12-07-06*	Lluviosa			28-07-06*	Lluviosa	
Punto 11 Siquirres- Guácimo	28-01-04	Lluviosa	Caribe	Punto 21 Alajuela Itiquís	14-03-02	Seca	Valle Central
	22-10-04	Lluviosa			01-10-03	Lluviosa	
	02-02-05	Lluviosa			11-10-04	Lluviosa	
	12-07-06*	Lluviosa			21-04-05	Seca	
27-01-04	Lluviosa	Caribe	Punto 22 Itiquís - San Isidro		14-03-02	Seca	
21-10-04	Lluviosa			01-10-03	Lluviosa		
26-01-05	Lluviosa			11-10-04	Lluviosa		
12-07-06*	Lluviosa			21-04-05	Seca		
Punto 13 Bribri - Sixaola	28-01-04	Lluviosa	Caribe Sur	Punto 23 Int Ruta 1 - Naranjo	07-08-02	Lluviosa	Valle Central
	21-10-04	Lluviosa			21-10-03	Lluviosa	
	26-01-05	Lluviosa			05-11-04	Lluviosa	
	13-07-06*	Lluviosa			27-04-05	Seca	
Punto 14 Manolos - La Garita	13-03-02	Seca	Valle Central	Punto 24 San Ramón - Puntarenas	11-07-06*	Lluviosa	Cordillera Guanacaste Tilarán
	03-11-03	Lluviosa			05-11-04	Lluviosa	
	13-10-04	Lluviosa			27-04-05	Seca	
	20-04-05	Seca			18-07-06*	Lluviosa	
	17-07-06*	Lluviosa		Punto 25 Florencio del Castillo	26-11-04	Lluviosa	Valle Central
13-03-02	Seca	22-04-05	Seca				
03-11-03	Lluviosa	14-07-06*	Lluviosa				
13-10-04	Lluviosa	Punto 26 Próspero Fernández	26-11-04		Lluviosa	Valle Central	
20-04-05	Seca		29-03-05*	Seca			
17-07-06*	Lluviosa		14-07-06*	Lluviosa			
Punto 15 La Garita - Bajo Garita	14-03-02	Seca	Valle Central	Punto 27 Nicoya - Santa Cruz	29-10-04	Lluviosa	Península Nicoya
	03-11-03	Lluviosa			26-04-05	Seca	
	13-10-04	Lluviosa			19-07-06*	Lluviosa	
	20-04-05	Seca			Punto 28 Liberia - La Cruz	28-10-04	
	17-07-06*	Lluviosa		25-04-05		Seca	
01-08-02	Lluviosa	18-07-06*	Lluviosa				
Punto 16 Bajo Garita - Atenas	01-08-02	Lluviosa	Valle Central	Punto 29 Arizona - La Irma	28-10-04	Lluviosa	Golfo Nicoya Llanura Guanacasteca
	03-11-03	Lluviosa			25-04-05	Seca	
	13-10-04	Lluviosa			18-07-06*	Lluviosa	
	20-04-05	Seca		Punto 30 La Cárcel (Puntarenas) - Caldera	04-11-04	Lluviosa	Golfo Nicoya Llanura Guanacasteca
	17-07-06*	Lluviosa			26-04-05	Seca	
Punto 17 Cacao - Sn Pedro Poás	01-08-02	Lluviosa	Valle Central	Punto 31 Esparza - San Ramón -	20-07-06*	Lluviosa	Golfo Nicoya Llanura Guanacasteca
	03-10-03	Lluviosa			28-10-04	Lluviosa	
	25-11-04	Lluviosa			25-04-05	Seca	
	27-04-05	Seca			18-07-06*	Lluviosa	
	11-07-06*	Lluviosa		Punto 32 Caldera - Orotina	04-11-04	Lluviosa	Golfo Nicoya Llanura Guanacasteca
07-08-02	Lluviosa	26-04-05	Seca				
Punto 18 Tacares - Grecia	15-10-04	Lluviosa	Valle Central	Punto 32 Caldera - Orotina	26-04-05	Seca	Golfo Nicoya Llanura Guanacasteca
	18-05-05	Lluviosa			20-07-06*	Lluviosa	
	28-07-06*	Lluviosa					

\* Nota: Las fechas marcadas con asteriscos no poseen información de la Temperatura del Pavimento en el momento de la realización de las mediciones, por lo cual fueron descartadas para el análisis. Fuente: (los Autores)

## Corrección de Deflectometría por Temperatura

El Instituto de Asfalto estableció un método para corrección de las deflexiones en función de la temperatura de la capa asfáltica. El procedimiento consiste en:

1. *Determinar la temperatura promedio de la capa asfáltica:* Para ello se supone un gradiente lineal de temperatura; por lo tanto la temperatura media de la capa asfáltica será el promedio entre la temperatura superficial y la de la fibra inferior. La temperatura del pavimento viene dada por:

$$t_{\text{pavimento}} = \frac{1}{2}(t_{\text{sup.pav}} + t_{\text{inf.pav}}) \quad [1]$$

donde,

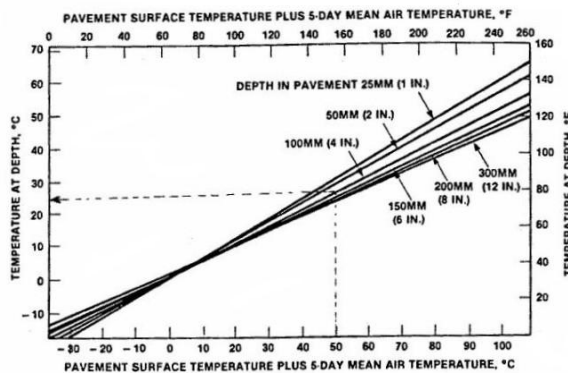
$t_{\text{pavimento}}$  = temperatura promedio del pavimento (°C)

$t_{\text{sup.pav}}$  = temperatura de la superficie del pavimento en el ensayo (°C)

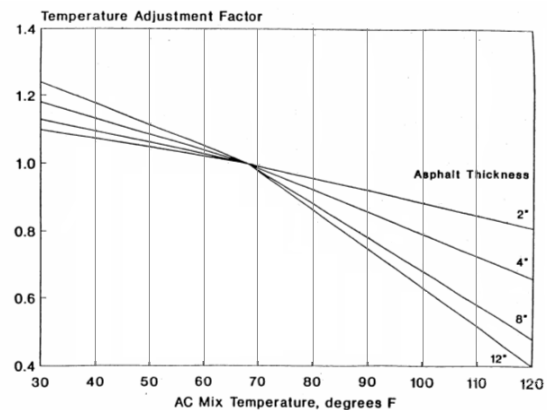
$t_{\text{inf.pav}}$  = temperatura en la fibra inferior del pavimento, (°C) estimada (ver Figura 3).

Nótese que es necesario conocer la temperatura superficial del pavimento en el ensayo y la temperatura media del aire de los 5 días previos al ensayo, así como el espesor de la capa asfáltica.

2. *Determinar el factor de corrección por temperatura:* Utilizando el valor de la temperatura promedio de la capa calculado anteriormente, se determina el factor de corrección por temperatura, para ello se utiliza la Figura 4, conforme a lo establecido en el método de la AASHTO 1993.



**Figura 3.-** Temperatura en función del espesor de la capa asfáltica. Fuente: (Asphalt Institute, s.f.)



**Figura 4.-** Factor de corrección por temperatura en función del espesor de la capa asfáltica. Fuente: (AASHTO, 1993)

Finalmente, la deflexión máxima corregida de la deflectometría de impacto es calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$d_{\text{max } 20^{\circ}\text{C}} = d_{\text{max ensayo}} \cdot F_{\text{ajtemp}} \quad [2]$$

donde:

$d_{\max 20^{\circ}\text{C}}$  = deflexión corregida a la temperatura estándar de 20°C

$d_{\max \text{ensayo}}$  = deflexión medida a la temperatura superficial del pavimento en el ensayo

$F_{\text{ajtemp}}$  = Factor de ajuste por temperatura

## ANÁLISIS ESTADÍSTICOS Y CONCLUSIONES OBTENIDAS

### Región Climática Caribe (C) y Región Climática Caribe Sur (CS)

Los puntos clasificados en la región Caribe son los ubicados en Aguas Zarcas-Venecia, Guápiles-Sarapiquí, Siquirres-Guácimo, Siquirres-Limón (ver Figura 5). Mientras que en la región Caribe Sur se tiene el punto 13, Bribri – Sixaola.

La región climática Caribe y la región climática Caribe Sur se caracterizan por 12 meses de estación lluviosa, por lo tanto las variaciones existentes en los resultados de la respuesta estructural, medida mediante la deflexión D1, no son producto de la variación estacional de módulos ya que nos encontramos en presencia de una única estación lluviosa a pesar de ser tomados en diferentes periodos del año.

En general para las estructuras evaluadas se observa una tendencia al aumento de las deflexiones producto del deterioro probable del pavimento. Además las diferencias entre los promedios para años consecutivos no son significativas estadísticamente en la mayoría de los casos.

Por último es importante observar la alta variabilidad presente en las deflexiones medidas para una misma estructura en la misma época, evidencia de la heterogeneidad presente en las estructuras y que se reduce significativamente para estructuras más “robustas”.

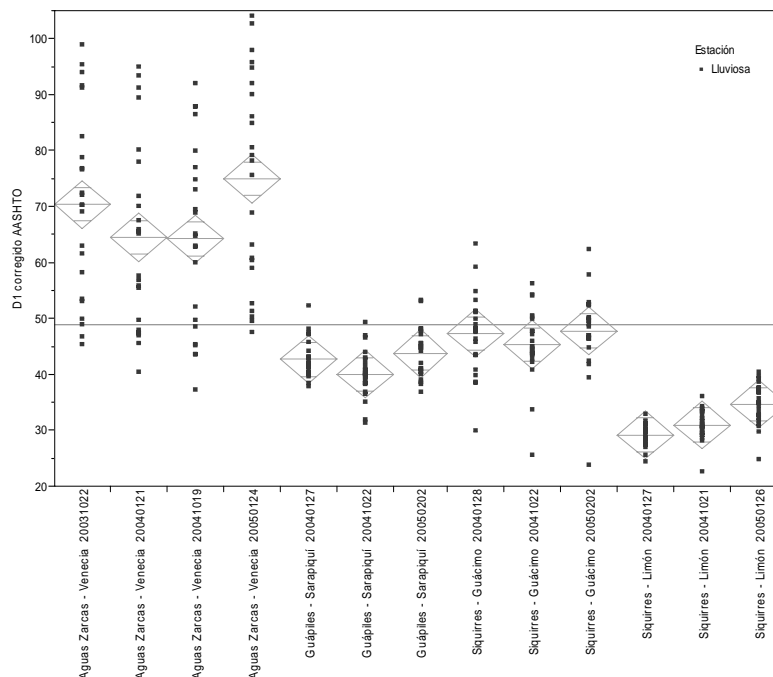


Figura 5.- Comparación de promedios de las deflexiones medida en la región climática Caribe



En general para las estructuras evaluadas se observa una tendencia al aumento de las deflexiones producto del deterioro probable del pavimento. Además las diferencias entre los promedios para años consecutivos no son significativas estadísticamente en la mayoría de los casos.

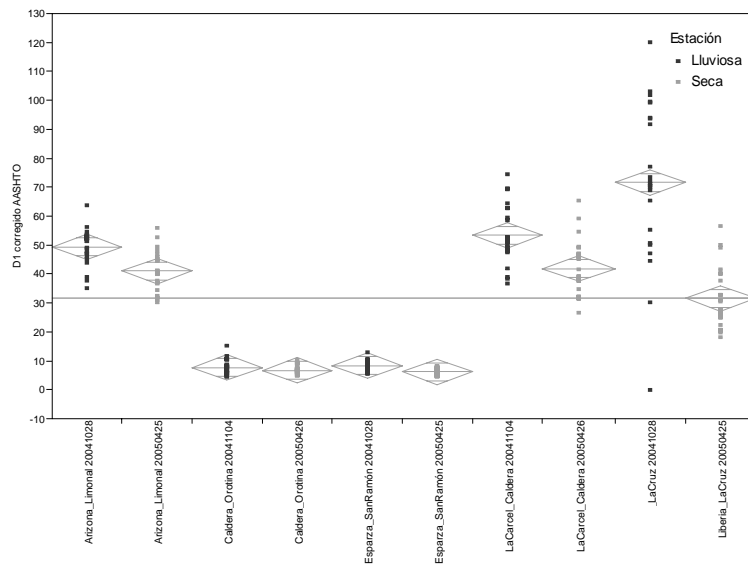
Por último es importante observar la alta variabilidad presente en las deflexiones medidas para una misma estructura en la misma época, evidencia de la heterogeneidad presente en las estructuras y que se reduce significativamente para estructuras más “robustas”.

### Región Climática Cordillera de Guanacaste Tilarán (CGT)

El punto clasificado en esta región es el punto 24, San Ramón – Puntarenas. Aunque existen datos de deflectometría recopilados de manera consecutiva para dos estaciones diferentes: Lluviosa y Seca; se tiene que una carpeta fue colocada durante el tiempo comprendido entre ambas. Según el análisis estadístico realizado, se puede afirmar con un 95% de confianza que no existe diferencia en los promedios de deflectometría para estas dos estaciones en este punto, a pesar de la colocación de la carpeta.

### Región Climática Golfo de Nicoya Llanura Guanacaste (GNG)

Los puntos clasificados en esta región son: Punto 29 Arizona – Limonal , Punto 32 Caldera – Orotina, Punto 31 Esparza – San Ramón, Punto 30 La Cárcel (Puntarenas) – Caldera y Punto 28 Liberia – La Cruz.



**Figura 6.-** Comparación de promedios de las deflexiones medida en la región climática Golfo de Nicoya Llanura de Guanacaste

En términos generales la región climática Golfo de Nicoya Llanura Guanacasteca se caracteriza por contar con una estación lluviosa y estación seca bien marcada.

En los puntos Arizona – Limonal, Liberia – La Cruz y La Cárcel (Puntarenas) – Caldera, con base en la evidencia estadística y el análisis estadístico se puede observar que existe variación significativa en las deflexiones para las diferentes estaciones (ver Figura 6). Por lo tanto se puede



afirmar con un 95% de confianza que los promedios de las deflexiones medidas en la estación Lluviosa y Seca son diferentes.

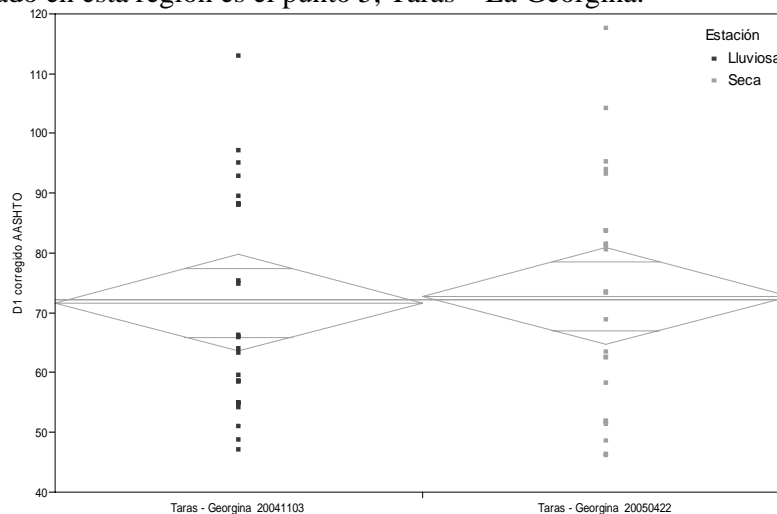
Para los dos puntos restantes, los datos de deflectometría recopilados de manera consecutiva para dos estaciones diferentes: Lluviosa y Seca, según el análisis estadístico realizado, se puede afirmar con un 95% de confianza que no existe diferencia en los promedios de deflectometría para estas dos estaciones en ambos puntos.

Con base en los resultados obtenidos podemos afirmar que existe para la región climática Golfo de Nicoya Llanura Guanacasteca una variación significativa de las deflexiones, que depende de la estación climática en la que nos encontramos (lluviosa o seca) sin embargo este efecto no es evidente en estructuras con deflexiones por debajo de los 20-25 mm<sup>2</sup>.

Nuevamente es importante recalcar la alta variabilidad en las deflexiones medidas en estructuras con grandes deflexiones y como esta variabilidad se reduce conforme la deflexión se reduce.

### Región Climática Los Santos (LS)

El punto clasificado en esta región es el punto 5, Taras – La Georgina.



**Figura 7.-** Comparación de promedios de las deflexiones medida en la región climática Los Santos

Se cuenta con datos correspondientes a dos estaciones diferentes: Lluviosa y Seca; con mediciones realizadas con diferencias de 6 meses. Según el análisis estadístico realizado, se puede afirmar con un 95% de confianza que los promedios de deflectometría para estas dos estaciones no son diferentes, es decir no se observa una variación estacional de deflectometrías para esta zona (ver Figura 7).

### Región Climática Pacífico Central (PC)

El punto clasificado es esta región es el punto 6, PZ –Dominical. Según el análisis estadístico realizado, se puede afirmar con un 95% de confianza que no existe variación estacional de deflexiones promedio para esta zona. Es importante observar que la estructura, en términos generales, presenta deflexiones bajas lo cual implica una disminución en la variación de las deflexiones entre estación lluviosa y seca.



### **Región Climática Península de Nicoya (PN)**

El punto clasificado es esta región es el punto 27, Nicoya – Santa Cruz. Con base en la evidencia estadística y el análisis estadístico se puede afirmar, con un 95% de confianza que los promedios de las deflexiones medidas en la estación Lluviosa y Seca son diferentes, es decir existe variación estacional de deflexiones promedio para esta zona. Es importante señalar que la estación seca y la estación lluviosa se encuentran bien marcadas en esta región.

### **Región Climática Upala y Los Chiles (UC)**

El punto clasificado es esta región es el punto 4, Ciudad Quesada – Los Chiles. Con base en la evidencia estadística y el análisis estadístico se puede afirmar con un 95% de confianza que no existe diferencia en los promedios de deflectometría para estas estaciones. Aunque existe para esta región dos estaciones definidas (seca y lluviosa), ambos con porcentaje anual significativo, los resultados pueden ser explicados ya que la estación seca se caracteriza por no ser tan marcada por el contrario son característicos los altos porcentajes de humedad y las lluvias.

### **Región Climática Valle Central (VC)**

Los puntos clasificados en esta región son: Punto 14 Manolos – La Garita, Punto 15 La Garita – Bajo La Garita, Punto 16 Bajo La Garita – Atenas, Punto 17 Cacao – Poás, Punto 18 Tacaes – Grecia, Punto 19 Alajuela – San Antonio, Punto 20 San Rafael – San Antonio, Punto 21 Alajuela – Itiquís, Punto 22 Itiquís – San Isidro, Punto 23 San Miguel – Naranjo, Punto 25 Florencio del Castillo y Punto 26 Próspero Fernández.

Dentro de la región climática Valle Central se tienen tres tendencias:

- a) Los puntos especificados como Itiquís – San Isidro, La Garita – Bajo La Garita, Manolos – La Garita, Tacaes – Grecia y Cacao – Poás, no presentan diferencias significativas en los promedios de deflexión con base en el análisis estadístico al 95% de confianza. Sin embargo, este grupo tiene una tendencia a reducir las deflexiones promedio en la estación seca respecto a la estación lluviosa.
- b) Un segundo grupo conformado por los puntos Alajuela – Itiquís y San Miguel – Naranjo, los cuales presentan diferencias significativas en los promedios de deflexión para la estación seca respecto a la estación lluviosa.
- c) Un tercer grupo donde se incluyen los puntos Bajo La Garita – Atenas y Florencio del Castillo para los cuales no existe evidencia estadística de diferencias en los promedios de deflexiones y además no existen tendencias en el comportamiento de las deflexiones entre la época lluviosa y seca.

Algunas situaciones importantes de aclarar son las siguientes:

- Los puntos Alajuela – San Antonio, Próspero Fernández y San Rafael – San Antonio no fue posible incluirlos dentro del análisis debido a que fueron evaluados únicamente en la estación lluviosa
- En los puntos Itiquís – San Isidro y Bajo La Garita – Atenas, se tiene una tendencia al deterioro de la ruta
- Se presenta una alta variabilidad de las deflexiones medidas en un tramo durante una misma estación.
- Para el punto Florencio del Castillo se concluye que no existe diferencias significativas entre las estaciones secas y lluviosas lo cual sigue siendo consistente con la tendencia de que pavimentos con estructuras “robustas” no presentan diferencias.



Por último y como resumen de las tendencias mostradas no se puede garantizar que no existan diferencias significativas producto de la variación estacional de módulos, existiendo puntos donde se comprobó dicha variación pero sobre todo por la existencia de una tendencia congruente a la reducción de deflexiones en la estación seca para la gran mayoría de los puntos evaluados.

### **Región Climática Valle del General (VG)**

Los puntos clasificados en esta región son: Punto 7 Juntas del Pacuar – Pérez Zeledón, Punto 8 Buenos Aires – Pérez Zeledón y Punto 9 Puerto Cortés – Palmar Norte.

En el punto Buenos Aires – Pérez Zeledón y en el punto Juntas de Pacuar – Pérez Zeledón, con base en la evidencia estadística y el análisis estadístico se puede afirmar con un 95% de confianza que no existe diferencia en los promedios de deflectometría para las estaciones Lluviosa y Seca, es decir no existe variación estacional de las deflexiones.

En el caso d punto Juntas de Pacuar – Pérez Zeledón, entre la primera campaña de evaluación realizada en el 2003 y la segunda evaluación realizada en el 2004, se dio una reducción significativa en las deflexiones, lo cual obedece a que en este periodo se colocó una sobrecarpeta.

En el punto Puerto Cortés – Palmar Norte, debe notarse que entre la primera campaña de evaluación realizada en el 2003 y la segunda evaluación realizada en el 2004, fue colocada una sobrecarpeta, a pesar de ello se presentó un aumento significativo en las deflexiones, producto de un deterioro acelerado. Posteriormente, entre esta segunda campaña de evaluación y la tercera campaña de evaluación realizada en el 2005, se nota una reducción significativa en el promedio de las deflexiones. De esta forma la evidencia estadística y el análisis estadístico permite afirmar con un 95% de confianza que los promedios de las deflexiones medidas en la estación Lluviosa y Seca son diferentes, es decir para este punto si existe variación estacional de deflexiones.

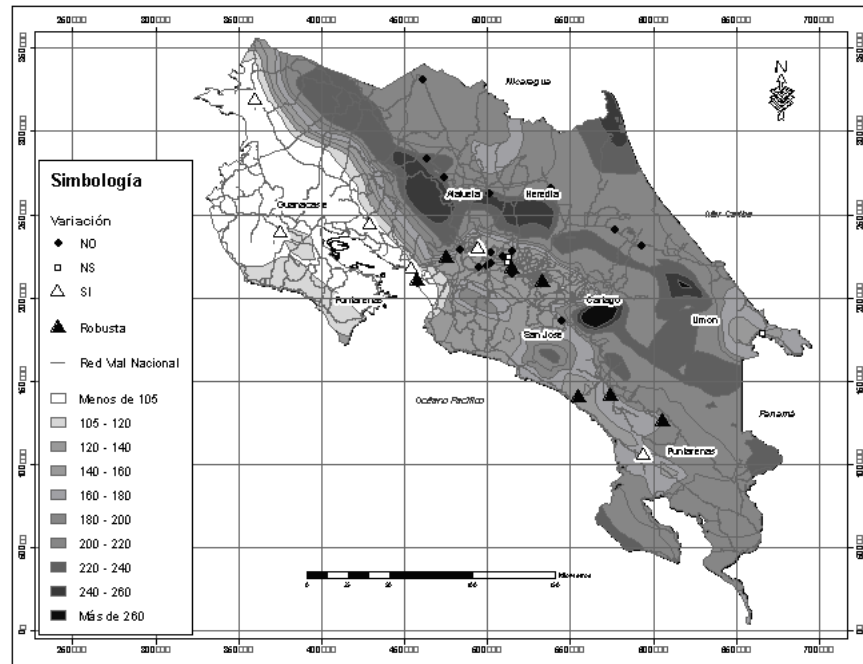
Es importante mencionar que aunque los puntos Buenos Aires – PZ y Juntas de Pactar – PZ, no presentaron diferencias significativas puesto que las estructura de los pavimentos tienen deflexiones por debajo de los  $20 \text{ mm}^2$ , caso contrario ocurre con la ruta Puerto Cortez – Palmar con deflexiones mayores, el cual si presenta diferencias

Teniendo en consideración cada una de las regiones climáticas y los análisis estadísticos realizados para cada uno de los puntos, se presentan a continuación de manera resumida las conclusiones obtenidas:

- La variación estacional de módulos para una estructura de pavimento se debe a cambios en el contenido de humedad de las capas granulares y suelos por lo tanto se espera que aquellas estructuras que son sometidas a cambios más marcados de humedad presentan las variaciones más significativas. Por el contrario zonas en las que no existen cambios importantes en la humedad no presentarán cambios importantes. Esta variación estacional de módulos se verá reflejada en las deflexiones medidas mediante el FWD, como equipo utilizado para valorar la capacidad estructural.
- Con base en lo anterior y al análisis realizado se logró comprobar que los puntos ubicados en las zonas climáticas: Caribe, Caribe Sur y Caribe Norte, no presentan variaciones significativas en las deflexiones. Esto se puede atribuir a que en estas zonas se presentan 11 ó 12 meses de estación lluviosa, por lo tanto no existen variaciones importantes de humedad. Por su parte la región Upala-Los Chiles si bien presenta un mayor número de meses catalogados como secos (cuatro meses) la condición predominante es esta zona es de alta humedad razón por la cual no se presentan variaciones significativas en las deflexiones.



- El caso contrario ocurre en las regiones Golfo de Nicoya Llanura Guanacasteca y Península de Nicoya, las cuales se caracterizan por la presencia de estaciones climáticas bien marcadas, se reflejan variaciones significativas de las deflexiones promedio. Por lo tanto y con base en lo anterior se concluye que en estas zonas existe un efecto significativo de la estación climática seca o lluviosa según corresponda.
- En el caso específico de la Región Valle Central, dentro de los puntos analizados se presentan estructuras cuyas deflexiones son significativamente diferentes, así como estructuras para las cuales las deflexiones no lo son, siendo esta segunda condición la más generalizada, no obstante, para este segundo grupo si se nota una tendencia en la reducción de las deflexiones en época seca respecto a la época lluviosa. Con base en lo anterior se recomienda tomar en cuenta la estación climática para la medición de las deflexiones en el Valle Central.
- Para la región Pacífico Central, si bien es cierto el análisis muestra que no existen diferencias significativas entre las deflexiones medidas en época lluviosa y seca. Este resultado puede deberse a que solo se estudió una estructura con deflexiones muy bajas las cuales tienden a no presentar diferencias entre la época lluviosa y época seca, por lo que para estructuras con mayores deflexiones podrían ser más evidentes las diferencias. Por lo anterior, se recomienda para esta región, tomar en cuenta la estación durante las mediciones, hasta no verificar lo contrario con mayor número de puntos.
- Para la región Los Santos se evaluó un punto ubicado en la ruta 2, el cual no presenta diferencias significativas entre los promedios de deflexión para la época lluviosa y seca, sin embargo por la variación en microclimas presentes en esta zona se recomienda tomar en cuenta la época del año en que se realizan las evaluaciones.
- En el caso de la región Valle del General, dados los resultados se recomienda tomar en cuenta la época lluviosa para las evaluaciones de deflectometría.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, todas aquellas rutas con deflexiones menores a los  $25 \text{ mm}^{-2}$ , no presentan diferencias significativas entre la estación seca y lluviosa, indiferentemente de la Región en la que se encuentra. Por lo tanto se puede concluir que para estructuras “robustas” la variación estacional de módulos no es significativa desde el punto de vista de las deflexiones medidas mediante el FWD. En la Figura 8, se distinguen con triángulos negros y están ubicados en su mayoría en el Valle Central y en la Zona Sur.



**Figura 8.-** Ubicación de los puntos para los días de lluvia. Fuente: (Orozco, 2007)

- Comparando los resultados obtenidos con la precipitación (días de lluvia en el año) para los puntos evaluados, podemos concluir que aquellos puntos que no presentaron diferencias significativas entre los resultados son los que se encuentran en zonas con más de 180 días de lluvia del año (50% días de lluvia). Esta información se puede observar en la Figura 9.

## RECOMENDACIONES

- En las zonas climáticas: Caribe Alta, Norte Alta, Pacífico Sur, Talamanca y Volcánica Central Pacífica no existen puntos de evaluados por lo tanto se recomienda incluir algunos para analizar el comportamiento de las deflexiones en estas zonas a lo largo del año.
- Es necesario, que los puntos que vayan a ser sujetos de estudio, cuenten con información lo más completa posible sobre sus características básicas (temperatura, precipitación, estructura –espesor y materiales-, tránsito)
- Es importante que se dé un seguimiento sistemático a cada punto de evaluación, de manera que se monitoreen periódicamente las deflexiones, así como cualquier cambio que pueda influir en la respuesta estructural del pavimento.

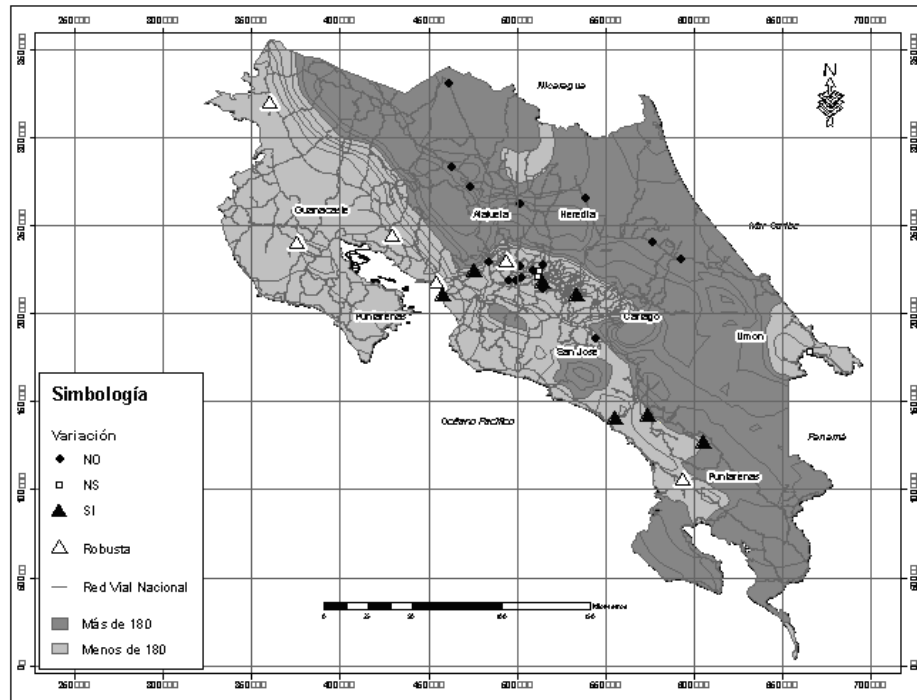


Figura 9.- Zonas con más de 180 días de lluvia en el año. Fuente: (Orozco, 2007)

- Para un futuro estudio sería recomendable realizar un análisis que permita correlacionar las estructuras –espesor y materiales- con la variación de las deflexiones, bajo las diferentes condiciones de temperatura y humedad que se presenten.
- Es conveniente incluir en estudios posteriores, retrocálculos de módulos que permitan concluir (según la estación climática del año) cómo varían los módulos de los distintos materiales dentro de la estructura del pavimento.

## REFERENCIAS

1. **American Association of State Highway and Transportation Officials.** (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993*. Washington, D. C., Estados Unidos.
2. **Asphalt Institute.** (s.f.) *Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*. Manual Series No. 17 (MS-17). Lexington, Kentucky, Estados Unidos.
3. **Badilla, G. & Sibaja, D.** (2008). *Análisis de resultados de Deflectometría de Impacto (FWD) para la evaluación de la respuesta estructural de los pavimentos para diferentes épocas del año en la Red Vial de Costa Rica*. Unidad de Investigación en Infraestructura Vial. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales. San José, Costa Rica.
4. **Orozco, E.** (2006). *Zonificación Climática de Costa Rica la Gestión de Obras Viales*. Proyecto para optar con el grado de licenciatura en Ingeniería Civil. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.