

Zonificación climática y herramientas para la gestión de la infraestructura vial de Costa Rica

Erick Gerardo Orozco Orozco 

Profesor e investigador, Universidad de Costa Rica, erik.orozco@ucr.ac.cr

San Ramón, Alajuela, Costa Rica

Recibido: 17 de octubre 2025

Aceptado: 1 Junio 2026

RESUMEN: El objetivo de la investigación fue elaborar una zonificación de Costa Rica con las variables climáticas necesarias para el diseño de pavimentos y otras estructuras relacionadas, con el propósito de mejorar la gestión de la infraestructura vial en general. La metodología analizó la construcción de la zonificación climática, mejoras en los modelos de las variables climáticas del país que han sido publicados y de uso general en profesionales, creación de nuevos modelos para las variables climáticas que tienen un impacto directo en la gestión de infraestructura vial, y la aplicación de esos modelos para el desarrollo de herramientas para tal gestión. Los resultados se identificaron 16 zonas con características climática y 8 zonas de planicie, ocurriendo inundaciones en C, CS, GNG, N, PC, PN, UC, además, mostraron como la altitud incrementa, la confianza del PG decrece en las dos vertientes (Caribe y Pacífico), y cada de las 16 zonas tiene su propio índice hídrico o de humedad. En conclusión, el clima afecta negativamente la infraestructura vial, aunque es posible construir una zonificación que integre los elementos y las características climáticas; asimismo, esta zonificación define zonas con un alto potencial de crecimiento de la red vial, tales como GNG, PN, VG, y PC.

Palabras claves: clima de Costa Rica; drenajes; intensidad de lluvia; pavimentos; seguridad vial; temperatura.

ABSTRACT: The objective of the research was to elaborate a zoning of Costa Rica with the necessary climatic variables for the design of pavement and other related structures, with the purpose of improving the road infrastructure management in general. The methodology analyzed the construction of a climatic zoning, improvements in the models of the country's climatic variables that have been published and are generally used by professionals in various fields, creation of new models for climatic variables that have a direct impact on road infrastructure management, and the application of these models in the development of tools for road infrastructure management. The results identified 16 zones for management of road infrastructure and 8 flatlands zones, occurring floodings in C, CS, GNG, N, PC, PS, PN, UC, additionally showed as the altitude increases, the reliability of the PG decreases to both slopes (Caribbean and Pacific), and each of the 16 zones has its own water or humidity index. In conclusion, the climate negatively affects the road infrastructure, although it is possible to construct a zoning that integrates climate elements and characteristics; also, this zoning defines zones with a high potential development of the road infrastructure, such as GNG, PN, VG, y PC.

Key words: Costa Ricas' climate; drainages; precipitation intensity; pavements; road safety; temperature.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, a través del tiempo, se han utilizado metodologías en el diseño de diferentes obras de infraestructura procedentes de países en donde las condiciones no se asemejan a las que aquí se dan en aspectos como clima, sismicidad, topografía e influencias oceánicas.

Costa Rica es un país con muchas particularidades. Una de las principales es la densidad de fenómenos naturales diversos. En sus 50 900 km² continentales, comprende elevaciones desde los 0 hasta los 3800 m s.n.m; está rodeada por dos océanos que abarcan más de 2000 kilómetros de litorales, los cuales a su vez modelan climas totalmente distintos; posee tres cadenas montañosas centrales, de las cuales dos presentan volcanes activos; suelos que presentan una amplia variedad de características geotécnicas; presenta además una geología que permite la formación de nacientes de agua y almacenaje en acuíferos que abastecen a un alto porcentaje de la población del país.

Uno de los elementos principales de su geografía son los pasos de montaña en donde se tiene la posibilidad de pasar de una vertiente a la otra en distancias cortas por las rutas que se han diseñado en ellos. Por esta variedad de condiciones y por la importancia que revisten esas rutas en términos socioeconómicos, es fundamental tener una base de datos que permita gestionar de forma adecuada los proyectos viales existentes y futuros. En ellos, factores como los regímenes excesivos de lluvia en el año (los cuales se traducen en términos de humedad en las obras sobre las cuales se apoya la carpeta de rodamiento que son sub - razante, base, sub - base), así como las fluctuaciones de temperatura afectan directamente los pavimentos. Además, las grandes tormentas con fuertes intensidades de lluvia inciden negativamente sobre las obras de drenaje. El exceso de humedad sobre los taludes de las rutas causa en muchos casos deslizamientos que impiden el paso y dañan la infraestructura directamente. Además, las adversas condiciones del tiempo, como por ejemplo la neblina o la lluvia continua, desfavorecen a los conductores en sus maniobras al impedir la visibilidad, el agarre en carretera y por ende provocan accidentes.

Mediante una zonificación climática es permisible generar propuestas para herramientas de gestión de la infraestructura vial, considerando de forma cuantitativa la influencia de las variables en los diseños. Por lo tanto, el objetivo es elaborar una zonificación de Costa Rica con las variables climáticas necesarias para el diseño de pavimentos y otras obras afines, así como a los sistemas de gestión de la infraestructura vial en general.

METODOLOGÍA

En este apartado, se describe la metodología de toda la investigación planteada, sin embargo, los resultados que se muestran posteriormente están enfocados a lo relacionado con los pavimentos. Se realizan tres tareas metodológicas fundamentales que definen el objetivo:

- Construcción de una zonificación climática del país que tenga aplicación en la gestión de infraestructura vial.
- Mejoras en los modelos de las variables climáticas del país que se han publicado y son de uso general en los profesionales de las distintas áreas.

- Creación de nuevos modelos para variables climáticas, los cuales tengan ingerencia directa en la gestión de la infraestructura vial.
- Aplicación de esos modelos en la consecución de herramientas para la gestión de infraestructura vial, entre ellos: Temperaturas para la determinación del PG del asfalto, datos de humedad para la cuantificación de los módulos de las capas inferiores del pavimento, herramientas para la gestión de taludes de corte y relleno, mapeo de intensidades de lluvia para el diseño de alcantarillas y cunetas, entre otros.



Figura 1. Metodología de desarrollo de la investigación.

Los efectos del clima interfieren significativamente en el diseño de pavimentos tanto rígidos como flexibles. En Costa Rica factores como la temperatura y la precipitación (que finalmente se traduce como humedad del suelo) causan el deterioro de las estructuras de este tipo.

En general, una división podría darse así: el factor de temperatura afecta directamente a las capas de rodamiento, y el factor de humedad afecta directamente a las capas inferiores conformadas de suelo como material de construcción. No obstante, el daño en capas inferiores genera daño de la superficie de rodamiento, de ahí que un problema de humedad también está asociado directamente con problemas a la superficie, aunque técnicamente no se involucre en el diseño de la carpeta de rodamiento. Los principales daños en la estructura de pavimento producto de las condiciones del clima son distintos en pavimentos rígidos y flexibles.

Dentro de los principales daños que ocasiona el clima en los pavimentos flexibles están los siguientes:

- El agrietamiento en las carpetas de rodamiento: Este es producto de los cambios drásticos de temperatura cuando la capa se enfría más de lo que soporta el ligante, o de la pérdida de capacidad estructural por humedecimiento de las capas inferiores. En el primer caso se da la grieta transversal, sin embargo, este no se ve en el país, pues los valores de temperatura que se debe alcanzar son menores que -10 °C. Para el segundo caso es muy típico de Costa Rica, y se manifiesta de en forma de agrietamiento tipo “cuero de lagarto”. Esto además de que ya es un daño, promueve la infiltración de agua lo cual genera humedad adicional y genera un deterioro acelerado de la estructura. Otro tipo de grietas son en las orillas y producto de la falla por deslizamiento. En ninguna circunstancia se deben mantener abiertas las grietas.
- Roderas o ahuellamiento: Se produce cuando se supera la máxima temperatura que soporta el ligante asfáltico, con lo cual este pierde rigidez y se empieza a comportar como un fluido viscoso. Al aplicar las cargas de tránsito se da un hundimiento longitudinal en las zonas por donde pasan las ruedas de los vehículos. Es una falla permanente. Así entonces, las fluctuaciones de temperatura juegan un papel en la escogencia del tipo de asfalto que se debe usar en un proyecto. Además, es posible que se den rodadas también por problemas de humedad en la subrasante. Cuando esta capa pierde capacidad estructural producto de la humedad excesiva, se puede dar un hundimiento de todas las capas superiores de pavimento.
- Baches abiertos: Estos se producen por el exceso de humedad en la base y subbase, lo cual es producto del pobre drenaje. El exceso de humedad debilita la capacidad estructural de estas capas, con lo que al aplicar las cargas de tránsito se da un hundimiento de la carpeta de rodamiento y se produce el bache. Sin embargo, un bache puede ser ocasionado por muchos factores, tanto estructurales como climáticos (Chaverri, 2006).

Para el caso de los pavimentos rígidos, se tienen las siguientes condiciones:

- Agrietamiento: Se da producto del alabeo natural que tiene el concreto frente a los cambios térmicos. Las expansiones y contracciones de las losas provocan agrietamientos si no se ha diseñado un adecuado sistema de juntas. Así, un pavimento de concreto con un mal diseño está expuesto al agrietamiento aún sin la presencia de cargas de tráfico. Las juntas deben ir selladas para evitar el ingreso del agua al interior de las losas y a las capas inferiores. En estas, las superficies de apoyo (capas inferiores) de las zonas de contacto entre losas (juntas) son potencialmente erosionables con el ingreso del agua. Dentro de los principales tipos de agrietamiento que se tienen son: longitudinal (en la dirección del tránsito), transversal (perpendicular a la dirección del tránsito), diagonal (se dan en las esquinas de la losa normalmente)
- Asentamiento: Se da cuando entre una losa y otra se tienen diferentes condiciones de medio soportante, producto de la humedad o la erosión. Es claro que se debe tener una adecuada transferencia de carga entre las losas para que no se de esta condición.

- Desprendimiento de bloques de concreto: Esta condición se da cuando la presión que ejercen las losas es tal que no pueden resistir más se dobla a lo largo, provocando una grieta transversal que desprende parte del concreto con lo cual se libera presión. Esta última se origina producto de las elevadas temperaturas y la falta de juntas de construcción.

El factor climático afecta de forma directa el comportamiento y el rendimiento de las estructuras de pavimentos. Ante estos problemas, en los diseños se deben considerar varios factores del clima para poder tener éxito en los proyectos. El mantenimiento preventivo (y no correctivo como se realiza en muchos países) permite solucionar daños en las estructuras que generan las variables del clima. La lluvia o la temperatura, desde una perspectiva ingenieril, no son adversas en ningún lugar, pues esas son las condiciones naturales que se deben prever y el especialista es el encargado de determinar cuales son los parámetros de la localidad en donde se va a desarrollar el proyecto y darles el adecuado proceso de análisis.

DETERMINACIÓN DEL PG (PERFORMANCE GRADE) DE UN PROYECTO EN COSTA RICA

Para determinar este dato en la elaboración de una mezcla asfáltica, se emplea la metodología SUPERPAVE. En el caso costarricense se tiene una variante significativa, ya que las bajas temperaturas no están presentes en el territorio y no es conveniente determinar la falla del ligante por agrietamiento producto de las temperaturas bajo cero grados, sino más bien por la fatiga producto de las condiciones normales de operación del proyecto, es decir la temperatura promedio. Así entonces, el grado del asfalto que se escoge está basado en la publicación de La Gaceta del Martes 20 de diciembre de 2005. Esta mediante decreto aprueba “El Reglamento Técnico Centroamericano de Especificaciones para Asfalto”. En este se hace referencia a la prueba de cizalla dinámica y se definen para el país los grados de desempeño para proyecto mediante esta especificación. La especificación requerida del PG de un proyecto en Costa Rica se muestra en el cuadro 1.

CUADRO 1. Valores para especificación de escogencia del PG en Costa Rica.

Altas Temperaturas (mayores a 40 °C)	Temperaturas promedio (mayores a 0°C)
PG 46	10, 7, 4
PG 52	25, 22, 19, 16, 13, 10, 7
PG 58	25, 22, 19, 16, 13
PG 64	31, 28, 25, 22, 19, 16
PG 70	34, 31, 28, 25, 22, 19
PG 76	37, 34, 31, 28, 25
PG 82	40, 37, 34, 31, 28

Fuente: Poder Ejecutivo, 2005.

ESCOGENCIA DEL VALOR DEL MÓDULO RESILIENTE (M_R) O DEL MÓDULO DE REACCIÓN (k) EN UN PAVIMENTO

El clima influye de manera directa en estas propiedades, ya que el valor de los módulos varía considerablemente según el contenido de humedad de los suelos. Sin embargo, en la ecuación de diseño de AASHTO, se incluye solamente un valor de todas las variaciones que tiene este parámetro a través del año. Por lo tanto, parte del proceso es determinar cuales son los valores de los módulos en las diferentes estaciones y generar el promedio que se debe emplear para obtener un daño equivalente.

En los países con condiciones climáticas extremas se pueden registrar valores de módulos diferentes en todos los meses, producto de la variación estacional entre invierno, primavera, verano y otoño. En el caso de Costa Rica se presentan tres condiciones climáticas características: época lluviosa, época de transición y época seca.

La metodología para determinación del módulo de diseño está ligada al concepto de daño relativo.

En el caso de los pavimentos flexibles este se calcula como:

$$u_f = 1,18 \times 10^8 (M_R)^{-2,32} \text{ (Ecuación 1)}$$

donde:

M_R es el módulo resiliente del suelo.

Para los pavimentos rígidos, el valor del daño relativo se calcula como:

$$u_r = (D^{0,75} - 0,39k^{0,25})^{3,42} \text{ (Ecuación 2)}$$

donde:

D es el valor del espesor de la losa de rodamiento en pulgadas.

k es el módulo de reacción del suelo.

En el cuadro 2 se muestra la metodología propuesta para obtener este valor del módulo de diseño.

CUADRO 2. Proceso de escogencia de los módulos resiliente (pavimento flexible) o de reacción (pavimentos rígidos) de diseño en Costa Rica.

Época	Módulo (M _R o k)	Daño Relativo (u)	Número de Meses en el año de esa época	Daño relativo por época
Seca	M _{RS}	u _S	A	A x u _S
Transición	M _{RT}	u _T	B	B x u _T
Lluviosa	M _{RL}	u _L	C	C x u _L
Total daño relativo				$\sum u = A \times u_S + B \times u_T + C \times u_L$
Daño relativo promedio				$\bar{u} = \frac{\sum u}{12}$
Módulo de diseño (M _R o k)				Ecuaciones 1 y 2 usadas para encontrar el valor de M _R o k.

PÉRDIDA DE SERVICIALIDAD POR SUELOS EXPANSIVOS

La servicialidad en una ruta suele perderse por tres factores fundamentales: el tráfico, la expansividad de los suelos, y la susceptibilidad al congelamiento en países fríos. Para el caso de Costa Rica, se tienen los dos primeros, pues no se alcanzan en ninguna zona con rutas de tránsito vehicular temperaturas tan bajas como para generar daños en este sentido. Sin embargo, una ruta aún sin tráfico, pero cimentada sobre suelos expansivos, sufre un daño a través del tiempo. Esta pérdida de servicialidad por expansividad de suelos está dada de forma analítica por:

$$\Delta PSI_{SW} = 0,003355 V_R P_S (1 - e^{-\theta t}) \text{ (Ecuación 3)}$$

donde:

θ es la constante de razón de expansividad dada en unidades de longitud sobre tiempo y varía entre 0,04 y 0,20

V_R es potencial de elevación y está dado en unidades de longitud.

P_S es el potencial de expansividad y está dado en porcentaje.

La metodología para la determinación de la pérdida se incluye en la Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 1993. Para la determinación de la constante de expansividad (coeficiente de hinchamiento θ) se debe incluir como parámetro la humedad del suelo, la que se puede relacionar con la precipitación anual según lo plantea la guía (figura 2). Entonces, si se tienen bajas precipitaciones en el año y un buen drenaje es señal de baja humedad suministrada a la subrasante, mientras que el caso opuesto, cuando hay altas precipitaciones y constantes en el año, además de un pobre drenaje está asociado a condiciones de alta presencia de humedad en el suelo.

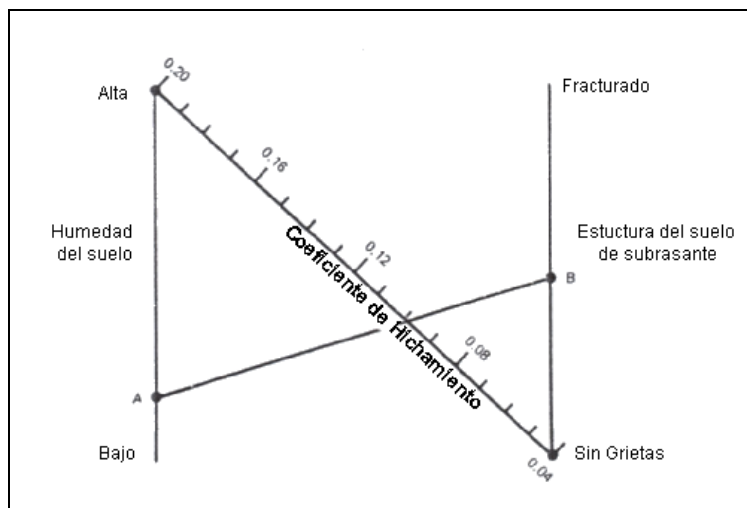


Figura 2. Nomograma para la determinación de la constante de expansividad en la fórmula de pérdida de servicialidad (coeficiente de hinchamiento) por suelos expansivos.

Fuente: AASHTO, 1993.

Se debe hacer referencia al valor del potencial de expansividad, el cual está dado en porcentaje. Este corresponde al porcentaje del área del proyecto que tiene potencial de hinchamiento. De ahí que es útil, tener zonificados y caracterizados de forma geotécnica los suelos presentes en la geografía del país.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aunque la investigación completa comprende una amplia variedad de resultados para los distintos componentes de los proyectos viales (como se explica en la metodología), en este artículo debido al enfoque del congreso, se presentan los que involucran directamente el pavimento como objeto de estudio.

LA ZONIFICACIÓN

La presente zonificación, aunque es de carácter climático en su origen, posee como función principal la aplicación a la gestión de infraestructura vial. En total se han definido 16 regiones climáticas a las cuales se les ha asignado un código, con el fin de simplificar su nombre cuando se hace referencia a cada una.

Los límites de las zonas se obtuvieron a partir de los siguientes insumos:

- Cuencas hidrográficas de Costa Rica.
- Clasificación climática de Köppen.
- Mapa de zonas de vida de Holdrige.
- Clasificación de los climas de Costa Rica de Wilbert Herrera, 1986.
- Clasificación climática propuesta por Solano y Villalobos del Instituto Meteorológico Nacional, 2000.

- Delimitación de zonas con alto potencial actual o de crecimiento futuro de la red vial. Esto se muestra en el mapa de densidad vial de Costa Rica generado como parte de la investigación (figura 3).

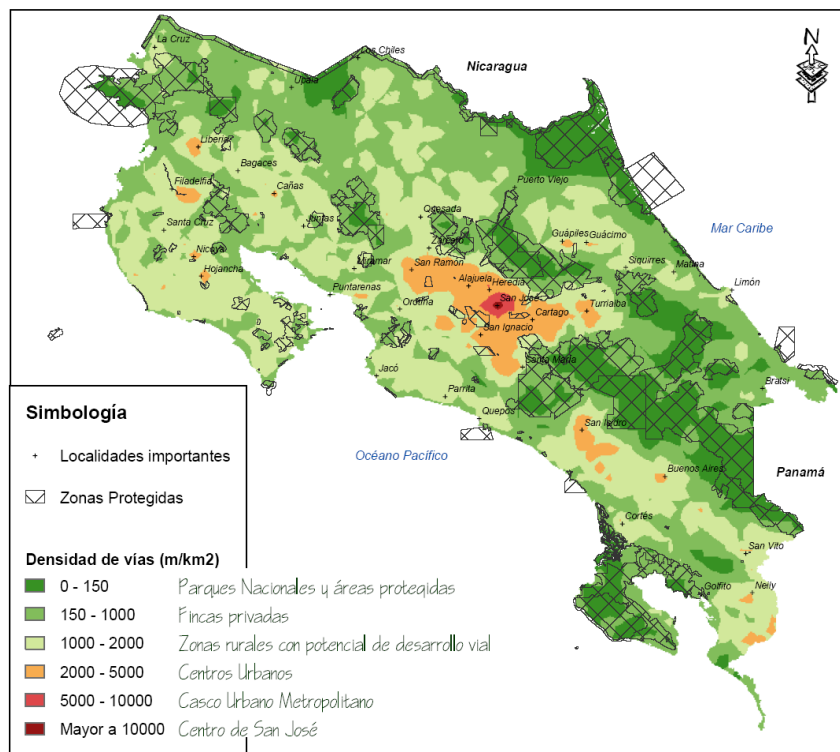


Figura 3. Densidad vial (red de carreteras y caminos) de Costa Rica. Basado en cuadrículas de 25 km² y red de carreteras y caminos del Instituto Geográfico Nacional Escala 1:50000.

La descripción en el país de cada una de las zonas se puede ver en la figura 4. Poseen variaciones significativas en su comportamiento, por las elevaciones (lo cual caracteriza los regímenes de temperaturas), la precipitación anual, los días de lluvia, el régimen estacional entre período seco y húmedo, y otras. En el cuadro 3, se muestran características físicas de las distintas regiones.

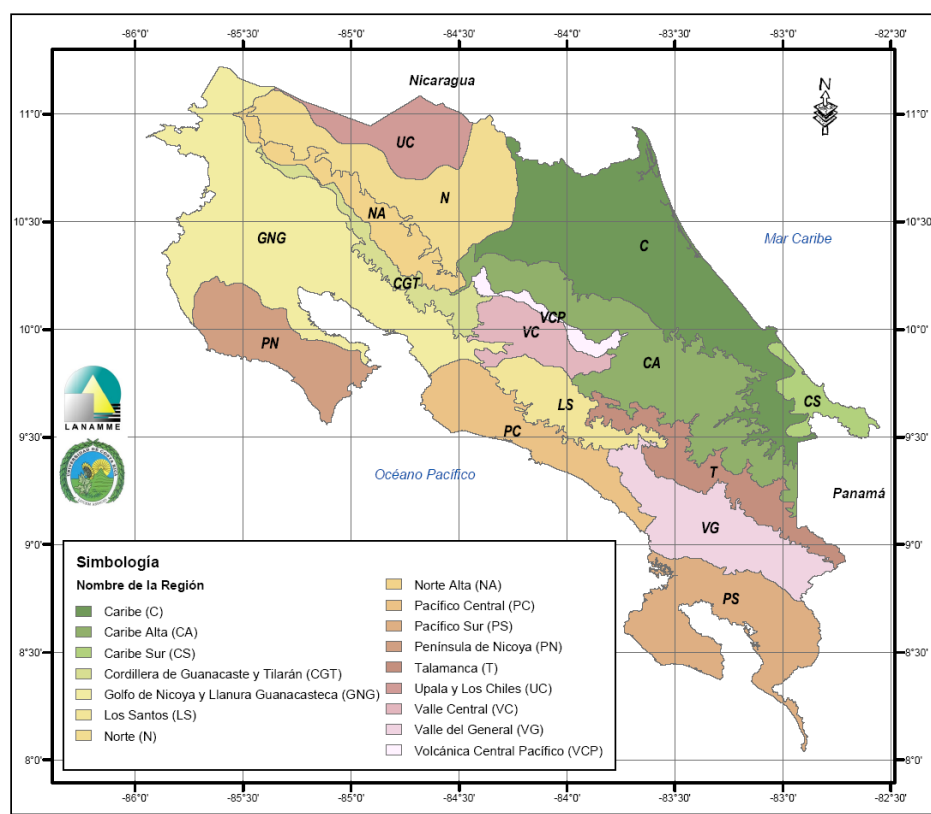


Figura 4. Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de infraestructura vial.

CUADRO 3. Variables geográficas promedio para cada una de las zonas propuestas.

Región	Símbolo	Área (km ²)	Porcentaje de área (%)	Elevación media (m s.n.m)
Caribe	C	8390	16,5	175
Caribe Alta	CA	5775	11,3	1411
Caribe Sur	CS	834	1,6	114
Cordillera de Guanacaste y Tilarán	CGT	1217	2,4	923
Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca	GNG	8620	16,9	170
Los Santos	LS	1665	3,3	1465
Norte	N	4212	8,3	194
Norte Alta	NA	1713	3,4	912
Pacífico Central	PC	2661	5,2	316
Pacífico Sur	PS	3872	7,6	233
Península de Nicoya	PN	2679	5,3	248
Talamanca	T	2178	4,3	2203
Upala y Los Chiles	UC	1890	3,7	92
Valle Central	VC	1478	2,9	1130
Valle del General	VG	3311	6,5	642
Volcánica Central Pacífico	VCP	474	0,9	1842
Total		50969	100,0	

EL CLIMA COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN

En el diseño de un proyecto vial, se requieren parámetros numéricos, los cuales permitan obtener espesores, ángulos de taludes, diámetros de alcantarillas, y otros datos que se incluirán en las obras que se construyan. No obstante, en aspectos como, por ejemplo, la seguridad vial, los parámetros de diseño muchas veces están relacionados con vidas humanas y no se pueden cuantificar de forma tan práctica como para otras obras.

En el cuadro 4 se pueden ver características climáticas puras de las distintas zonas. Algunas de estas son de importante aplicación en la gestión de obras viales, y muchas permiten incidir en las políticas nacionales de seguridad vial.

Para el caso de Costa Rica, se deben resaltar las zonas con condición de neblina casi perenne. Estas son: CGT, CA, VCP, NA. Estas al tener pasos de montaña (zonas ubicadas entre formaciones montañosas), poseen rutas muy importantes de la red vial del país, ya que comunican regiones de alta productividad con el Valle Central (principal región socioeconómica de Costa Rica) y también desde luego se da la comunicación entre regiones periféricas.

En su gestión, estas vías deben tener una adecuada señalización tanto informativa como preventiva, pues se caracterizan por la poca visibilidad producto de su diseño geométrico de montaña (curvas muy pronunciadas) y desde luego de las condiciones casi perennes de lluvias o neblina presentes en estas. Presentan un problema adicional que es falta de carriles y zonas de adelantamiento, con lo cual se vuelven aún más peligrosas en materia de la psicología del conductor. Deben tener además por las condiciones climáticas un adecuado diseño de drenajes y taludes, además de obras de protección para evitar que los conductores de las vías se salgan de las mismas y puedan caer a precipicios de gran profundidad como se dan estas zonas.

Entre las zonas con puntos de mayor intensidad de lluvia se encuentran GNG y CGT. Esos valores de elevadas intensidades son coincidentes en algunos casos con zonas en las cuales se dan pasos de montaña desde el Caribe. En la estación lluviosa del Pacífico los vientos llevan las lluvias a estas zonas desde el suroeste, y los pasos de montaña permiten la entrada de los vientos del noreste. Así, un choque frontal detiene la humedad que ingresa del Pacífico (pues los vientos del Noreste al pasar por las Cordilleras son secos) y provocan precipitaciones muy fuertes descargando en poco tiempo altas cantidades de lluvia. Zonas como Liberia, Bagaces, Tilarán y San Ramón tienen esta condición tan particular. Ya estas zonas fueron mencionadas en el capítulo anterior junto con los modelos de intensidad. Para ellas se deben elaborar diseños de alcantarillas muy detallados, pues un mal diseño de alcantarilla puede dar al traste con una vía.

En estas localidades, se debe tener una adecuada implementación de los alcantarillados pluviales, pues al tener intensidades tan elevadas, es posible que, si no son diseñados para períodos de retorno altos, puedan colapsar provocando pérdidas aún mayores, propiamente en las ciudades. El potencial de inundaciones es otro de los factores que genera problemas en la infraestructura vial en algunas de las zonas. Como se mencionó anteriormente existen 8 zonas de planicie, las cuales poseen

elevaciones medias menores en todos los casos a 300 m.s.n.m. Estas llevan al mar caudalosos ríos, los cuales generan inundaciones año con año.

La frecuencia en la ocurrencia de inundaciones ha predominado en la Vertiente del Caribe, en donde ríos como el Matina, Pacuare, Reventazón, San Carlos, Banano, Bananito, Sixaola, y otros, han causado pérdidas millonarias. Los daños principales se dan en puentes, aumentando con ello el impacto producido en el daño, ya que sus reparaciones requieren mucho tiempo para la ejecución y además provocan pérdidas operativas en las vías sumamente elevadas. No obstante, también se destruyen gran cantidad de kilómetros de pavimentos y no dejando de lado desde luego las pérdidas humanas y de la calidad de vida de los habitantes de estas zonas. En el Pacífico, Ríos como el Parrita, el General, Tempisque y Bebedero, y otro más han inundado poblaciones tales como Bagaces, Quepos, Parrita, y otras, generando también pérdidas millonarias para el país. Es así como la gestión en el diseño de puentes y terraplenes de acceso a estos en zonas bajas es esencial, y para las 8 zonas definidas en el presente estudio se debe tener esa condición. Es válido recordar que esas zonas son: C, CS, GNG, N, PC, PS, PN, UC. De estas las que registran tradicionalmente la mayor problemática son Caribe, GNG, Caribe Sur y Pacífico Central.

CUADRO 4. Principales características climáticas requeridas en la gestión de infraestructura vial de las distintas zonas.

Región	Características principales
Caribe	Precipitaciones muy altas durante todo el año, inundaciones, alta humedad, altas temperaturas.
Caribe Alta	Precipitaciones por orografía durante todo el año, mayor régimen de humedad del país, mayor cantidad de días de lluvia, presencia de neblina casi perenne para elevaciones entre los 600 y 1500 m.s.n.m., topografía irregular, alta propensión a deslizamientos.
Caribe Sur	Precipitación moderada durante el año, altas temperaturas.
Cordillera de Guanacaste y Tilarán	Precipitaciones moderadas en el año, zonas con alta velocidad del viento en los pasos de montaña, presencia de nubosidad ocasional en los pasos de montaña, temperaturas moderadas, altas intensidades de lluvia en algunas zonas.
Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca	Temperaturas más altas del país, zonas muy secas, intensidades de lluvia más altas del país, menor cantidad de días de lluvia, muy alta velocidad del viento en época seca.
Los Santos	Zona montañosa, topografía muy irregular, altas precipitaciones, propensión a deslizamientos, temperaturas muy bajas en algunos puntos (Cerro de la Muerte).
Norte	Alta cantidad de días de lluvia en el año, alta precipitación anual, elevada humedad, altas temperaturas.
Norte Alta	Alta cantidad de días de lluvia en el año, elevado promedio de precipitación, saturación de los suelos producto del exceso de precipitación y baja temperatura, topografía irregular, potencial de deslizamientos, presencia de neblina durante un alto porcentaje del tiempo.
Pacífico Central	Alta fluctuación térmica, presencia de elevada humedad, altas temperaturas, fuerte época lluviosa, topografía irregular con fuertes taludes en muchos tramos de las rutas, potencial de inundación en las zonas bajas costeras.
Pacífico Sur	Elevado nivel de humedad, alta precipitación anual, altas temperaturas, alta

Región	Características principales
	cantidad de días de lluvia en el año.
Península de Nicoya	Elevadas temperaturas, régimen pluviométrico regular, elevaciones bajas con muchas irregularidades en el interior de la península.
Talamanca	Zona montañosa, elevada cantidad de días de lluvia y precipitación anual, prevalecen las condiciones frías producto de las elevaciones.
Upala y Los Chiles	Condiciones de precipitación moderadas, humedad moderada, altas temperaturas.
Valle Central	Condiciones climáticas muy regulares, período seco prolongado, vientos fríos y de alta velocidad en el inicio de la época seca.
Valle del General	Altas temperaturas, precipitación de regular a alta, fluctuaciones térmicas significativas en el día y en el año.
Volcánica Central Pacífico	Condiciones climáticas muy regulares, disminución de la temperatura conforme se asciende sobre la Cordillera, presencia de neblina en las zonas más altas, principalmente las que están cerca de los pasos de montaña (Coronado, Zarcero, San José de la Montaña, Pacayas de Alvarado entre otras).

GRADOS DE DESEMPEÑO DE LOS ASFALTOS PARA LAS DISTINTAS REGIONES

En el diseño de los pavimentos, una de las fases es la escogencia adecuada del ligante asfáltico que se va a emplear en la mezcla. Para el caso de Costa Rica, no se asociará este dato a cada una de las zonas propuestas, ya que estas poseen variación en la temperatura producto de las diferencias de elevaciones dadas en el interior de cada una, con lo cual no es posible designar un solo PG en los proyectos viales que se desarrollan por ejemplo en la zona LS por citar algún caso (figura 4).

Sin embargo, se propone una división en lo que concierne a las dos Vertientes. Esta es la zonificación fundamental planteada. Para cada una de estas, se designaron grados de desempeño para elevaciones que van a cada 250 m, desde el nivel de mar hasta los 3500 m s.n.m., lo cual es la mayor elevación que podría experimentar un proyecto vial en Costa Rica; aunque existen elevaciones mayores, estas zonas están protegidas por la ley como parques nacionales y no es posible de desarrollo de infraestructura más que la de acceso.

En la escogencia de temperaturas se emplea la metodología SUPERPAVE, con la salvedad de que se debe asignar el PG al proyecto que se propone en la norma costarricense que se puede observar en el cuadro 1. En los cuadros 5 y 6 se observan los datos de los PG para las bandas de elevación a cada 250 m s.n.m el cual, combinado con el mapa topográfico (figura 5) permite escoger los valores requeridos.

CUADRO 5. Grado de desempeño (PG) de proyecto en Costa Rica para bandas de elevación a cada 250 m para la vertiente del Caribe. Los datos de temperaturas para los cálculos son obtenidos de estaciones del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

Vertiente	Elevaciones (m s.n.m)		PG para una confiabilidad del ... %					
	Desde	Hasta	50	85	90	95	98	99,9
Caribe	0	250	58 22	58 22	58 22	64 19	64 19	64 19
	250	500	58 22	58 22	58 22	58 19	58 19	64 19
	500	750	58 22	58 19	58 19	58 19	58 16	58 16
	750	1000	58 19	58 19	58 19	58 16	58 16	58 16
	1000	1250	52 19	58 16	58 16	58 16	58 16	58 13
	1250	1500	52 19	52 16	52 16	52 13	52 13	58 13
	1500	1750	52 16	52 16	52 16	52 13	52 13	52 10
	1750	2000	52 16	52 13	52 13	52 13	52 10	52 10
	2000	2250	52 13	52 13	52 13	52 10	52 10	52 10
	2250	2500	46 13	52 10	52 10	52 10	52 7	52 7
	2500	2750	46 10	46 10	46 10	46 7	46 7	52 7
	2750	3000	46 10	46 7	46 7	46 7	46 7	46 4
	3000	3250	46 10	46 7	46 7	46 4	46 4	46 4
	3250	3500	46 7	46 7	46 4	46 4	46 4	46 4

CUADRO 6

Grado de desempeño (PG) de proyecto en Costa Rica para bandas de elevación a cada 250 m en la vertiente del Pacífico. Los datos de temperaturas para los cálculos son obtenidos de estaciones del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

Vertiente	Elevaciones (m s.n.m)		PG para una confiabilidad del ... %					
	Desde	Hasta	50	85	90	95	98	99,9
Pacífico	0	250	64 25	64 22	64 22	64 22	64 22	64 22
	250	500	58 22	58 22	64 22	64 22	64 22	64 22
	500	750	58 22	58 19	58 19	58 19	58 19	64 19
	750	1000	58 19	58 19	58 19	58 19	58 19	58 16
	1000	1250	58 19	58 16	58 16	58 16	58 16	58 16
	1250	1500	52 16	58 16	58 16	58 16	58 16	58 13
	1500	1750	52 16	52 13	52 13	52 13	52 13	58 13
	1750	2000	52 13	52 13	52 13	52 13	52 13	52 10
	2000	2250	52 13	52 10	52 10	52 10	52 10	52 10
	2250	2500	46 13	52 10	52 10	52 10	52 10	52 7

Vertiente	Elevaciones (m s.n.m)		PG para una confiabilidad del ... %					
	Desde	Hasta	50	85	90	95	98	99,9
	2500	2750	46 10	46 7	46 7	46 7	46 7	52 7
	2750	3000	46 10	46 7	46 7	46 7	46 7	46 4
	3000	3250	46 7	46 7	46 4	46 4	46 4	46 4
	3250	3500	46 7	46 4	46 4	46 4	46 4	46 4

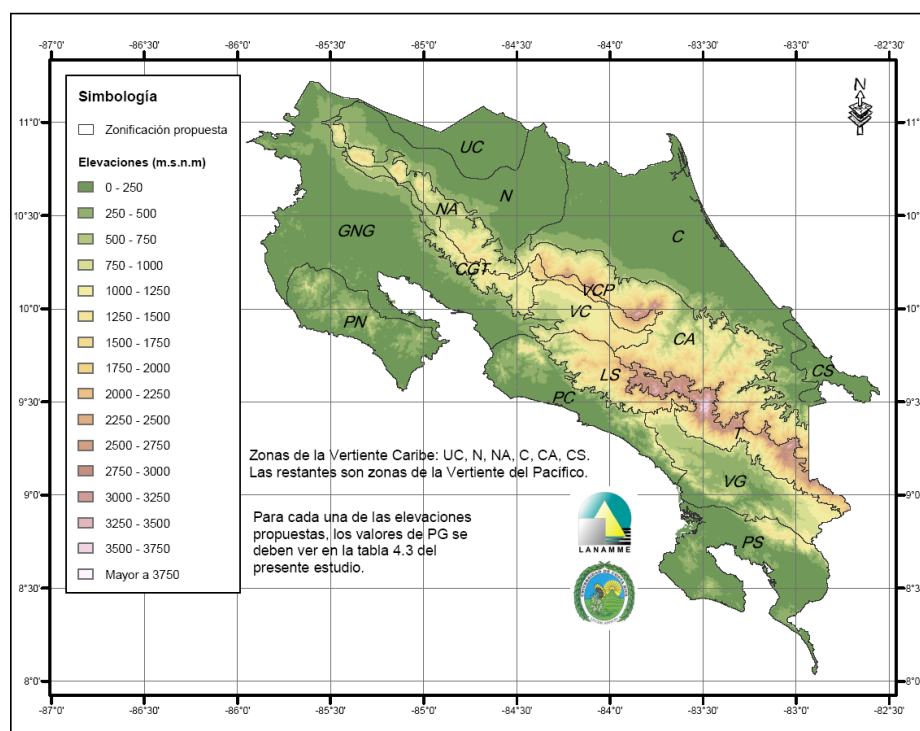


Figura 5. Elevaciones a cada 250 m s.n.m para escogencia del PG en Costa Rica. Fuente: Atlas Digital Costa Rica, 2000.

PROPUESTA CLIMÁTICA PARA MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE MÓDULOS DE DISEÑO EN LOS SUELOS

El suelo es uno de los materiales base involucrados en el diseño de un pavimento. Como tal, el estudio, definición y cuantificación de sus propiedades es una labor indispensable para obtener buenos resultados en la gestión de infraestructura vial.

Dentro de los parámetros del suelo que dependen del clima está el valor de los módulos de resiliencia (pavimentos flexibles) o de reacción (pavimentos rígidos), dado que la humedad genera variaciones significativas en los mismos.

En el caso costarricense aun no se ha hecho un muestreo general para poder delimitar tanto las zonas como las épocas en las cuales se debe medir el valor de los módulos y garantizar la heterogeneidad de los mismos. Sin embargo, actualmente el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LANAMME) está realizando un proyecto en esta línea.

En este sentido, y con el fin de delimitar propiamente la variable climática para el muestro de los módulos, se propone una tabla basada en la zonificación elaborada, la cual permite definir según las zonas en las cuales se estén desarrollado los proyectos, cuales deben ser las épocas en que se midan los módulos, inclusive recomendando por mes para las tres épocas climáticas características de Costa Rica. El cuadro 7 es, además, una herramienta de programación de obras, ya que combinada con el mapa de días de lluvia en Costa Rica (figura 6), el cual se desarrollo como parte de esta investigación, define en cuales épocas es mas probable que se tengan lluvias en las distintas zonas del país, y con ello la posibilidad de programar el mantenimiento periódico de la red vial, y esto no solo en los pavimentos, sino también las obras como taludes o limpieza de drenajes.

CUADRO 7. Datos de meses para uso en la escogencia de los módulos de resiliencia y reacción de las subrasantes en las distintas zonas.

Zona	Símbolo	Meses de Época seca (Mes característico)	Meses de Época de transición (Mes característico)	Meses de Época Lluviosa (Mes característico)
Caribe	C	0	1(setiembre)	11 (diciembre)
Caribe Alta	CA	0	1 (setiembre)	11 (diciembre)
Caribe Sur	CS	0	2 (marzo, setiembre)	10 (diciembre)
Cordillera de Guanacaste y Tilarán	CGT	3 (marzo)	2 (abril, diciembre)	7 (setiembre, octubre)
Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca	GNG	5 (marzo)	2 (abril, noviembre)	5 (setiembre, octubre)
Los Santos	LS	4 (marzo)	2 (abril, noviembre)	6 (setiembre, octubre)
Norte	N	0	1 (marzo)	11 (setiembre)
Norte Alta	NA	1 (marzo)	2 (febrero, abril)	9 (setiembre)
Pacífico Central	PC	3 (marzo)	2 (abril, diciembre)	7 (setiembre, octubre)
Pacífico Sur	PS	3 (febrero)	1 (abril)	8 (octubre)
Península de Nicoya	PN	4 (marzo)	2 (abril, noviembre)	6 (setiembre)
Talamanca	T	3 (enero, febrero, marzo)	1 (diciembre)	8 (setiembre)
Upala y Los Chiles	UC	4 (marzo)	1 (diciembre)	7 (setiembre)
Valle Central	VC	5 (marzo)	1 (finales de abril, principios de noviembre)	6 (setiembre)
Valle del General	VG	3 (marzo)	2 (abril, diciembre)	7 (octubre)
Volcánica Central Pacífico	VCP	3 (marzo)	2 (abril, diciembre)	7 (setiembre)

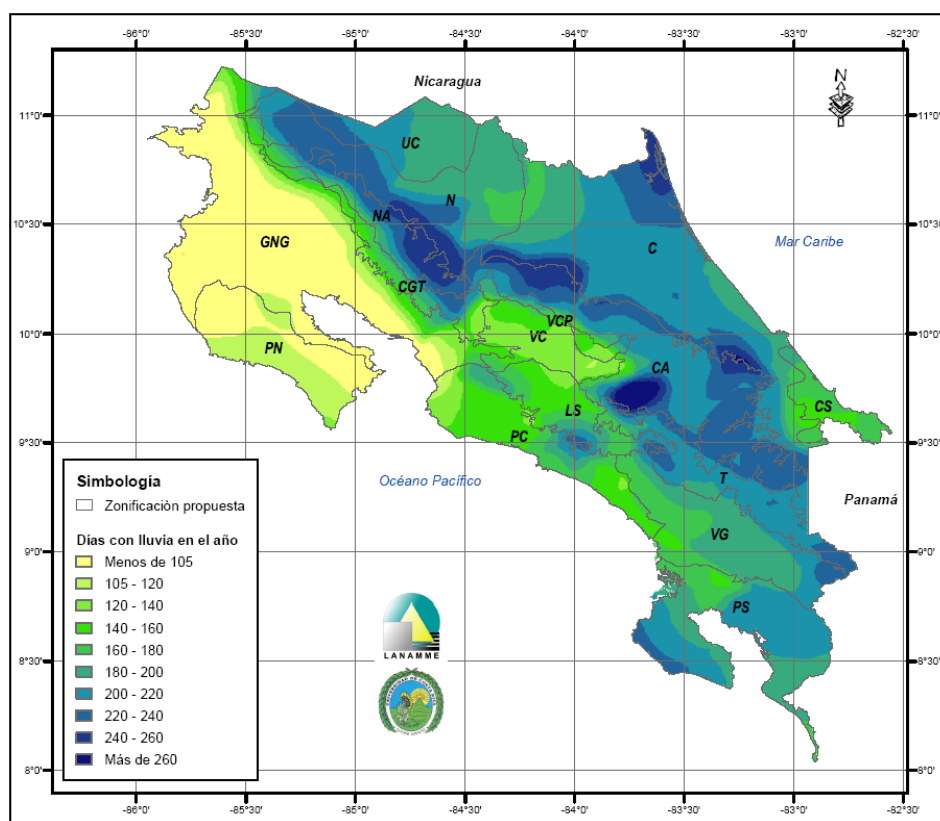


Figura 6. Días con lluvia en el año y zonificación propuesta en Costa Rica.
Fuente: Solano y Villalobos, 2000.

METODOLOGÍA PARA CALCULAR EL VALOR DE LA CONSTANTE DE EXPANSIVIDAD

Para poder cuantificar esta constante, es necesario proponer un parámetro que involucre la influencia de la lluvia como portadora de humedad hacia los suelos. De esta forma, se formula el “índice de humedad” (o índice hídrico). Este está dado en función de los días de lluvia y el valor de la precipitación anual en mm. Se define el I_h como:

$$I_h = (D_{\text{lluvia}} \times P_{\text{anual}}) / 365000 \text{ (Ecuación 4)}$$

donde:

D_{lluvia} es el número de días de lluvia en el año

P_{anual} es la precipitación media anual en mm

La forma en que se interpreta este índice equivale al porcentaje del año en el cual se distribuye la lluvia. El 365000 equivale al producto de los 365 días del año por 1000 mm. De ahí que las unidades en las que se expresa el índice de humedad son en metros.

En el cuadro 8 se muestran los valores característicos a los cuales se puede asociar el dato de humedad del suelo que se muestra en la parte izquierda del gráfico para la determinación de la constante de expansividad (figura 2). En el cuadro 9, se tiene el índice de humedad promedio espacial en cada una de las zonas propuestas en el presente estudio. En la figura 7, se presenta la distribución del índice de humedad en Costa Rica. Esta al combinarse con una zonificación de suelos en donde se

identifiquen regiones con arcillas expansivas, permite completar la metodología que se presenta. Vale acotar que el índice hídrico no solo es un parámetro de aplicación en la gestión de infraestructura vial, sino que como tal es un parámetro hidrológico muy significativo en la planificación del uso del recurso hídrico y determinación de zonas vulnerables a las sequías e inundaciones.

CUADRO 8. Clasificación cualitativa del índice de humedad para su uso en la escogencia del valor de la constante de expansividad.

Clasificación	Valores del índice de humedad (I_h) (m)
Seco	Menor a 1,00
Húmedo Seco	1,00 - 1,75
Húmedo	1,75 - 2,40
Muy Húmedo	2,40 - 3,30
Extremadamente Húmedo	Mayor a 3,30

CUADRO 9. Índices de humedad promedio espacial correspondientes a cada una de las zonas propuestas.

Zona	Símbolo	Índice de Humedad Promedio (m)	Clasificación
Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca	GNG	0,58	Seco
Península de Nicoya	PN	0,72	Seco
Valle Central	VC	0,87	Seco
Caribe Sur	CS	1,14	Húmedo Seco
Volcánica Central Pacífico	VCP	1,25	Húmedo Seco
Cordillera de Guanacaste y Tilarán	CGT	1,29	Húmedo Seco
Los Santos	LS	1,44	Húmedo Seco
Pacífico Central	PC	1,50	Húmedo Seco
Valle del General	VG	1,65	Húmedo Seco
Upala y Los Chiles	UC	1,67	Húmedo Seco
Norte	N	1,98	Húmedo
Talamanca	T	2,07	Húmedo
Norte Alta	NA	2,08	Húmedo
Pacífico Sur	PS	2,30	Húmedo
Caribe Alta	CA	2,36	Húmedo
Caribe	C	2,40	Muy Húmedo

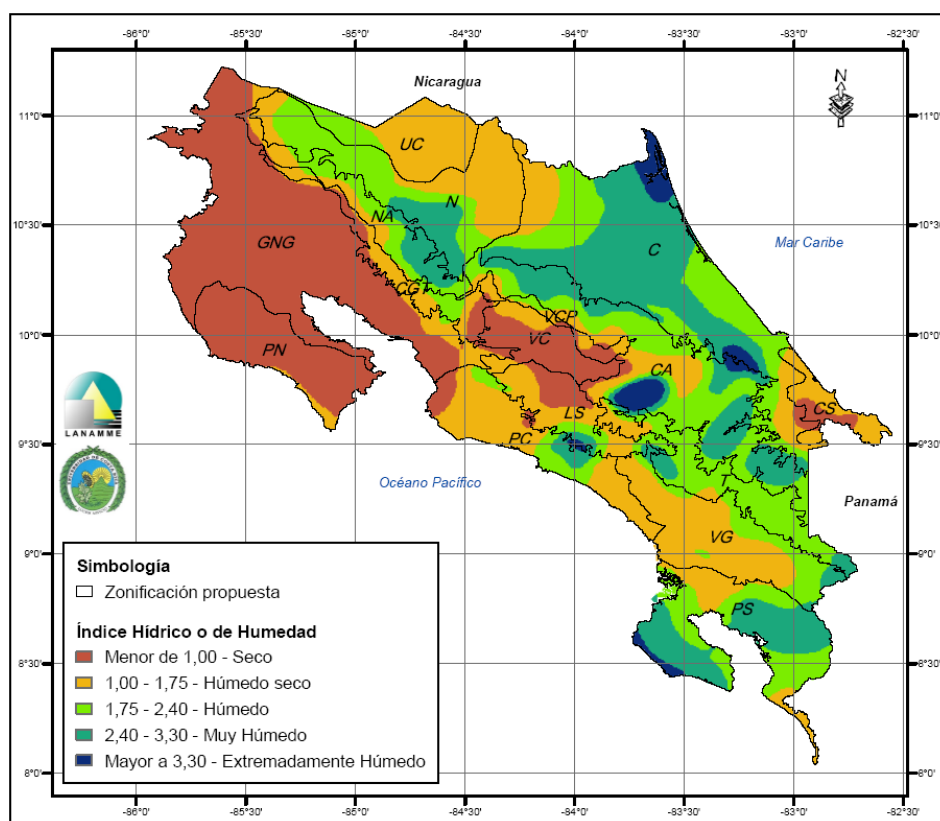


Figura 7. Distribución del índice Hídrico o de humedad en Costa Rica y zonificación propuesta.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Es posible en un país, construir una zonificación que asocie los elementos y características del clima de las distintas regiones a la gestión de la infraestructura vial, la cual está influenciada y determinada durante toda su vida útil por el clima.
- La zonificación propuesta, además de características climáticas, define zonas con un alto potencial de crecimiento de la red vial, como los son las de GNG, PN, VG, y PC. Esta definición se basa en los criterios mostrados en el modelo de densidad de carreteras.
- Las nuevas metodologías de diseño (empírico - mecanista) involucran la variable climática como un insumo jerárquicamente igual a las cargas de tránsito en el diseño. Se debe recordar que en Costa Rica tradicionalmente un alto porcentaje de los esfuerzos en la obtención de información previa se han dirigido a la determinación de las proyecciones de tránsito en las vías. De ahí la importancia de la inclusión directa y bases de datos para uso en la gestión de infraestructura vial.
- En Costa Rica no existe una normativa clara que identifique suficientes aspectos del clima en la gestión de infraestructura de carreteras. Básicamente se cita como elemento único la publicación en la Gaceta de la norma para asfaltos relacionada con el PG.

- El clima afecta de forma negativa a la infraestructura vial, sin embargo, esta afectación se da forma distinta entre los distintos componentes de una vía. Por ejemplo, los pavimentos como tales en su carpeta se ven afectados más por la temperatura, mientras que las capas inferiores se ven afectadas mayormente por la humedad.
- No se debe responsabilizar al clima por el mal estado de las carreteras, ya que en jerarquía sería idéntico responsabilizar al exceso de tránsito sobre las mismas, lo cual en el fondo es una señal que hace ver el problema en la gestión.
- Los elementos que se deben tener presente en la gestión de infraestructura vial son: el clima, las cargas tránsito y los materiales. La interacción entre estos tres elementos, y la respuesta de los mismos ante la operación de la obra se basan en el diagnóstico que se pueda hacer de estos, con lo cual está ampliamente justificada la inversión en la investigación y desarrollo de bases de datos para su uso en la gestión.

RECOMENDACIONES

- Se deben gestionar de forma integral y equitativa todos los elementos que componen un proyecto vial, ya que tradicionalmente en Costa Rica se le ha dado un alto porcentaje de inversión solo al pavimento. La integralidad en la gestión se valora cuando en el fallo de una obra como un talud, se induce en grandes pérdidas, tanto económicas como humanas en el peor de los casos.
- Con el fin de promover una cultura de seguridad vial, aquí se han descrito zonas en las cuales se debe tener una inversión en este campo, pues por sus condiciones climáticas la visibilidad es poco favorable y son rutas en las cuales el registro de accidentes es muy elevado.
- Se debe incorporar de forma directa la variable clima en la gestión de las vías, pues en la cultura de diseño actual la variable más importante que se considera es el tránsito.

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo y sincero agradecimiento a William Vargas, quien fue el director de este proyecto, brindando tanto el apoyo como la motivación en realizar esta investigación. Asimismo, al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME) con su ayuda en el conocimiento técnico.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). Design of pavement structures. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Barrantes, J. A., Liao, A., & Rosales, A. (1985). Atlas Climatológico de Costa Rica. Ministerio de Agricultura e Instituto Meteorológico Nacional.
- Chaverri, J. (2006). Curso de Pavimentos [Notas de clase]. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Coronado Iturbide, J. (2002). Manual centroamericano para el diseño de pavimentos. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional y Secretaría de Integración Económica.
- Elizondo, F. (2006). Tecnología SHRP para asfaltos. Metodología SUPERPAVE [Presentación en diapositivas]. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Herrera, W. (1986). Clima de Costa Rica. Editorial Universidad Estatal a Distancia (EUNED).
- Huang, Y. (2004). Pavements analysis and design (2nd ed.). Prentice Hall.
- Jiménez, M. (2006). Diseño de mezcla superpave asfalto [Presentación en diapositivas]. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.
- Poder Ejecutivo. (2005). Decreto Ejecutivo N° 32812 COMEX-MINAE-MEIC. La Gaceta N° 245. https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2013/07/RTCA_75_01_20_04_Gasolina_Superior.pdf
- de Solminihaç Tampier, H. (1998). Gestión de infraestructura vial. Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Solano Quintero, J., & Villalobos Flores, R. (2001). Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico climático de Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos, 8(1), 26-39. https://www.researchgate.net/publication/228799654_Aspectos_Fisiograficos_aplicados_a_un_Bosquejo_de_Regionalizacion_Geografico_Climatico_de_Costa_Rica