

Modelos predictivos aplicados a datos climáticos y dengue: un enfoque espacio-temporal y de aprendizaje de máquinas.

Shu Wei Chou-Chen

Escuela de Estadística - Centro de Investigación en Matemática Pura y Aplicada (CIMPA)

Universidad de Costa Rica

25 de mayo, 2023



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EEs Escuela de
Estadística

CIMPA Centro de Investigación en
Matemática Pura y Aplicada

Contenidos

- 1 **Introducción**
- 2 **Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas**
- 3 **Emulador espacio-temporal climático (downscaling)**
- 4 **Conclusiones**

Introducción

- El dengue es una enfermedad sensible al clima (temperatura, humedad, precipitación, etc.).
- Afecta la biología, el comportamiento y la disponibilidad del mosquito para reproducirse, desarrollarse, propagar el virus e interactuar con el huésped humano.
- El uso de imágenes satelitales y monitoreo del clima como datos de entrada en modelos de aprendizaje automático y otros enfoques de aprendizaje estadístico han mostrado resultados prometedores que podrían predecir de manera efectiva el riesgo relativo de transmisión del dengue.



Contenido

1 Introducción

2 Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas

- Datos
- Modelo para cada cantón
 - Entrenamiento del modelo
 - Predicción
 - Resultados
- Modelo espacio-temporal
 - Metodología
 - Resultados

3 Emulador espacio-temporal climático (downscaling)

- Métodos de aproximación

4 Conclusiones

Preliminares

En Costa Rica:

- Circulación endémica de tres de los cuatro serotipos del virus del dengue (DENV-1, DENV-2, DENV-3).
- Clima tropical, que proporciona condiciones ideales para que el vector del mosquito sobreviva, se replique y transmita la enfermedad.
- Microclimas separados por distancias cortas hacen que sea crucial personalizar el análisis de riesgo de transmisión del dengue en un país.



Preliminares

- Las autoridades sanitarias no utilizan formalmente la información meteorológica como entrada para desarrollar actividades de prevención y control.
- Una colaboración inicial con las autoridades sanitarias costarricenses permitió identificar 32 municipios (cantones) de interés basados en sus características entomológicas y epidemiológicas.

Preliminares

- Se utilizaron dos enfoques de modelado diferentes para predecir el riesgo relativo de infecciones por dengue en 32 cantones en Costa Rica:
 - Barboza LA, Chou-Chen SW, Vásquez P, García YE, Calvo JG, et al. (2023) **Assessing dengue fever risk in Costa Rica by using climate variables and machine learning techniques**. PLOS Neglected Tropical Diseases 17(1): e0011047. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0011047>
 - Chou-Chen, S. W., Barboza, L. A., Vásquez, P., García, Y. E., Calvo, J. G., Hidalgo, H. G., & Sanchez, F. (2023). **Bayesian spatio-temporal model with INLA for dengue fever risk prediction in Costa Rica**. arXiv preprint arXiv:2302.06747.

Contenidos

1 Introducción

2 Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas

- Datos
- Modelo para cada cantón
 - Entrenamiento del modelo
 - Predicción
 - Resultados
- Modelo espacio-temporal
 - Metodología
 - Resultados

3 Emulador espacio-temporal climático (downscaling)

- Métodos de aproximación

4 Conclusiones

Datos

Dengue:

- Casos mensuales sospechosos y confirmados clínicamente de fiebre del dengue en Costa Rica desde el año 2000 hasta 2021.
- Riesgo relativo:

$$RR_{i,t} = \frac{\frac{\text{Casos}_{i,t}}{\text{Población}_{i,t}}}{\frac{\text{Casos}_{CR,t}}{\text{Población}_{CR,t}}}$$

Datos

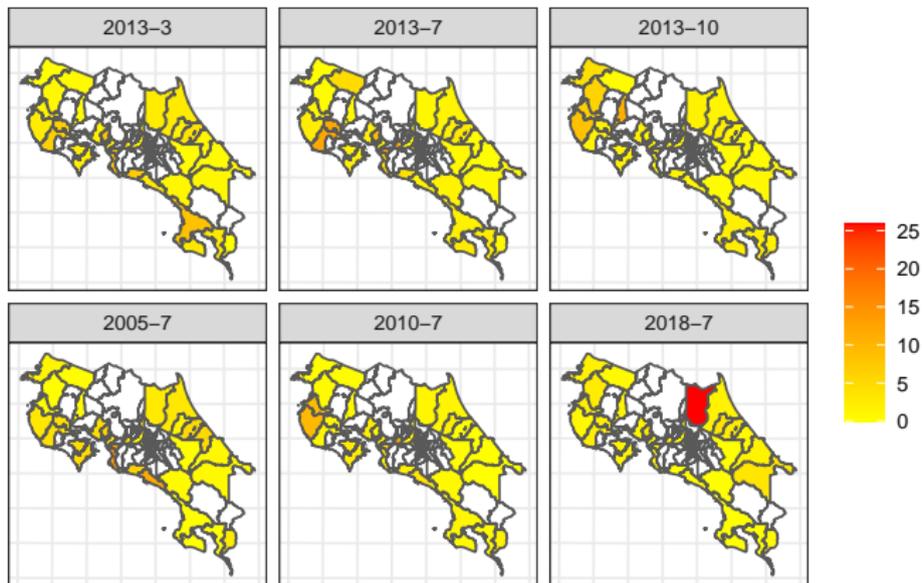


Figura 1: Riesgo Relativo (RR) de los 32 cantones en estudio para diferentes meses y años de datos disponibles.

Datos

Clima:

- **Cálculos de precipitación diaria** ($P_{i,t}$): obtenido de datos de Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS).
- **Anomalía de la temperatura de la superficie del mar ENSO** ($S_{i,t}$): obtenido del Climate Prediction Center (CPC), National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA).
- **Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)** ($N_{i,t}$): obtenido del Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).
- **Temperatura de la superficie terrestre durante el día** ($L_{i,t}$): obtenida de MODIS.
- **Índice Tropical del Atlántico Norte** ($TN_{i,t}$): obtenido de NOAA.

Contenidos

- 1 **Introducción**
- 2 **Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas**
 - Datos
 - **Modelo para cada cantón**
 - Entrenamiento del modelo
 - Predicción
 - Resultados
 - Modelo espacio-temporal
 - Metodología
 - Resultados
- 3 **Emulador espacio-temporal climático (downscaling)**
 - Métodos de aproximación
- 4 **Conclusiones**

Entrenamiento del modelo

- Para cada cantón fijo $i, i = 1, \dots, 32$, dividimos el conjunto de datos en:
 - Período de calibración:** de enero de 2000 a diciembre de 2020.
 - Período de prueba:** de enero de 2021 a marzo de 2021.
- Incorporación de las asociaciones históricas retrasadas de las covariables climáticas aplicando un marco de modelo no lineal de retardo distribuido (DLNM) (Gasparrini, 2014; Gasparrini et al., 2010).
- Consiste en un espacio bidimensional de funciones que especifica una función de exposición-retardo-respuesta, que depende del predictor x a lo largo de los retardos temporales ℓ :

$$s(x; t) = \int_{\ell_0}^{\ell_1} f \cdot w(x_{x-\ell}, \ell) d\ell \approx \sum_{\ell=\ell_0}^{\ell_1} f \cdot w(x_{x-\ell}, \ell). \quad (1)$$

Entrenamiento del modelo

La estructura de los modelos en términos de la variable dependiente y las covariables para un cantón i es la siguiente:

$$RR_t \sim f(RR_{t-1}, C_1 P_t, C_2 S_t, C_3 N_t, C_4 L_t, C_5 TN_t, M_t) \quad (2)$$

donde

f es una función que depende del método (GAMLSS o RF), las matrices C_i se definen en términos de la representación DLNM, y M_t es una variable de tipo factor que describe el efecto fijo mensual.

Entrenamiento del modelo

1 GAMLSS:

$$RR_t \stackrel{ind}{\sim} \mathcal{D}(\mu, \sigma, \nu)$$

$$g_1(\mu) = \beta_{10} + \beta_{11}RR_{t-1} + \beta_{12}C_1P_t + \beta_{13}C_2S_t \\ + \beta_{14}C_3N_t + \beta_{15}C_4L_t + \beta_{16}C_5TN_t + \beta_{17}M_t$$

$$g_2(\sigma) = \beta_{20}$$

$$g_3(\nu) = \beta_{30}$$

donde \mathcal{D} es la distribución gamma ajustada a cero (ZAGA):

$$f_Y(y) = \begin{cases} \nu & \text{si } y = 0; \\ (1 - \nu)f_W(y) & \text{si } 0 < y < \infty. \end{cases}$$

para $0 \leq y < \infty$, donde $W \sim GA(\mu, \sigma)$ es la distribución gamma con $0 < \mu < \infty$, $0 < \sigma < \infty$ y $0 < \nu < 1$

2 Bosque aleatorio: Un método de conjunto que consiste en una gran cantidad de árboles de decisión.

Predicción

- Se utiliza el modelo vectorial autorregresivo (VAR) para cada cantón para predecir las covariables climáticas en el período de prueba, ya que las covariables climáticas utilizadas en este estudio están altamente correlacionadas.
- Estas predicciones climáticas, junto con los riesgos relativos predichos, se utilizan para proporcionar pronósticos de la variable dependiente durante el período de prueba.

Predicción

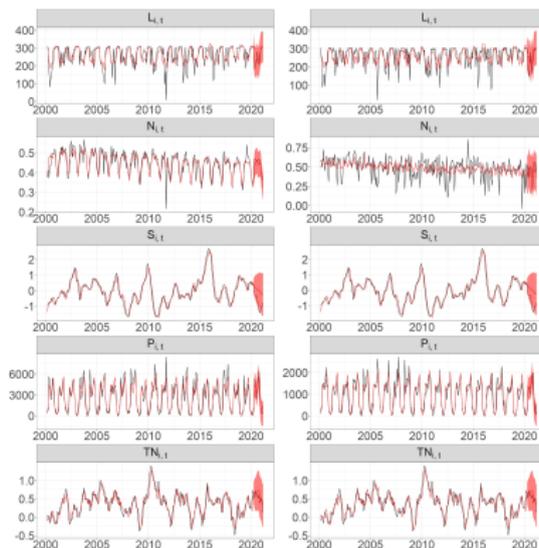


Figura 2: Covariables climáticas observadas y valores de pronóstico en dos cantones específicos: Alajuela (paneles izquierdos) y Quepos (paneles derechos). Línea negra: covariables climáticas observadas, línea roja: valores de pronóstico y áreas sombreadas en rojo: regiones de confianza del 95 %.

Predicción

- Aplicamos bootstrap no paramétrico para construir intervalos de predicción.

Comparación de modelos:

- 1 Raíz de error cuadrático medio normalizado (*NRMSE*):

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{mRR} \sum_{t=1}^m (RR_t - \widehat{RR}_t)^2}$$

- 2 Puntuación de intervalo (interval score) normalizado (*NIS_α*) con α :

$$NIS_{\alpha} = \frac{1}{mRR} \sum_{t=1}^m \left[(U_t - L_t) + \frac{2}{1-\alpha} (L_t - RR_t) \cdot 1_{RR_t < L_t} + \frac{2}{1-\alpha} (RR_t - U_t) \cdot 1_{RR_t > U_t} \right],$$

Resultados

Cuadro 1: Especificación DLNM para covariables climáticas (máximo de 18 meses)

Covariable	esp. variable	esp. rezago
Precipitación ($P_{i,t}$)	B-spline	lineal
Anomalía de la temperatura de la superficie del mar ($S_{i,t}$)	B-spline	lineal
Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) ($N_{i,t}$)	lineal	lineal
Temperatura de la superficie terrestre diurna ($L_{i,t}$)	lineal	lineal
Índice tropical del Atlántico norte ($TN_{i,t}$)	lineal	lineal

- Estas elecciones permiten un equilibrio aceptable entre la complejidad de los modelos y la precisión predictiva en todas las ubicaciones.
- Por lo tanto, podemos predecir el riesgo relativo de dengue para los primeros tres meses de 2021.

Resultados

Cuadro 2: Mejor modelo para cada cantón

Cantón	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> ₉₅	Mejor Modelo
Alajuela	0.2218	2.2789	RF
Alajuelita	0.2650	13.9639	GAMLSS
Atenas	1.7615	16.6668	GAMLSS
Cañas	0.4572	8.8197	GAMLSS
Carrillo	0.7468	13.2383	GAMLSS
Corredores	7.4754	32.9063	RF
Desamparados	0.0333	0.9103	RF
Esparza	0.5269	13.5993	RF
Garabito	32.7929	151.7930	GAMLSS
Golfito	0.7657	13.0531	RF
Guácimo	1.9182	8.1629	RF
La Cruz	9.1306	127.2412	RF
Liberia	2.2955	57.4666	RF
Limón	2.1313	18.4764	RF
Matina	3.9168	31.3834	GAMLSS
Montes de Oro	18.9354	162.9258	RF
Nicoya	5.3693	47.4291	GAMLSS

Resultados

Cantón	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> ₉₅	Mejor modelo
Orotina	0.0860	0.6048	RF
Osa	2.4703	2.8810	GAMLSS
Parrita	8.0959	33.1650	GAMLSS
Perez Zeledón	1.7181	14.7112	GAMLSS
Pococí	0.6451	10.2410	RF
Puntarenas	1.7821	22.3798	GAMLSS
Quepos	34.3754	179.4324	GAMLSS
San José	0.0195	2.5938	RF
Santa Ana	0.6331	31.8002	RF
Santa Cruz	0.7159	13.4637	GAMLSS
Sarapiquí	0.5572	1.7992	RF
Siquirres	0.8202	6.6540	RF
Talamanca	10.9225	26.2873	RF
Turrialba	0.9400	7.0685	GAMLSS

Resultados

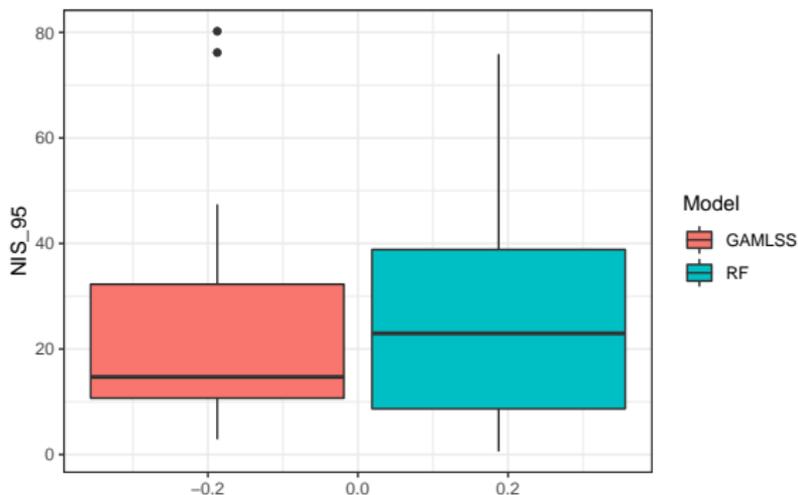


Figura 3: Comparación de la distribución de la métrica NIS entre los métodos.

Resultados

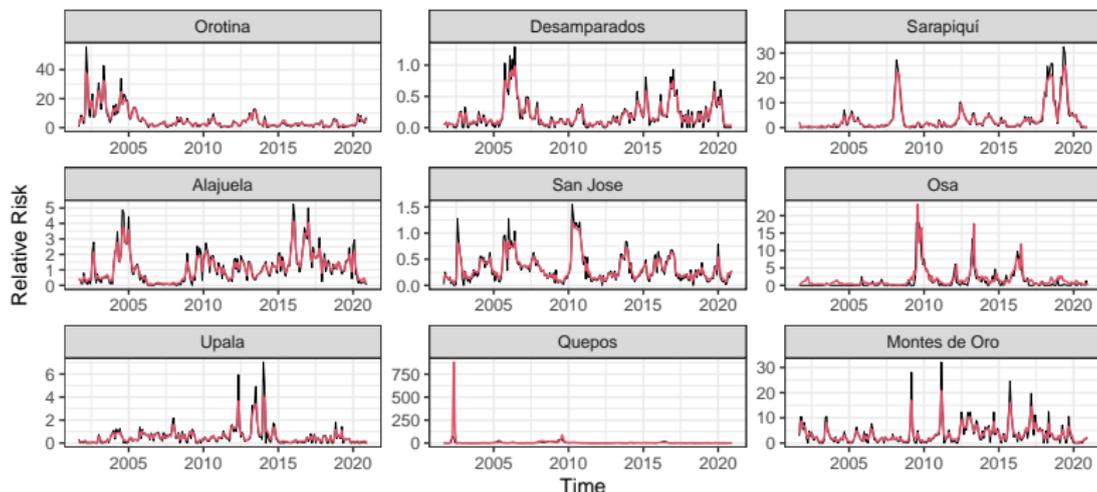


Figura 4: Comparación durante el periodo de ajuste. Los seis paneles superiores muestran los mejores cantones según la métrica NIS. Los tres paneles inferiores muestran los peores cantones según la métrica NIS. La línea negra representa el RR observado, la línea roja representa el RR estimado.

Resultados

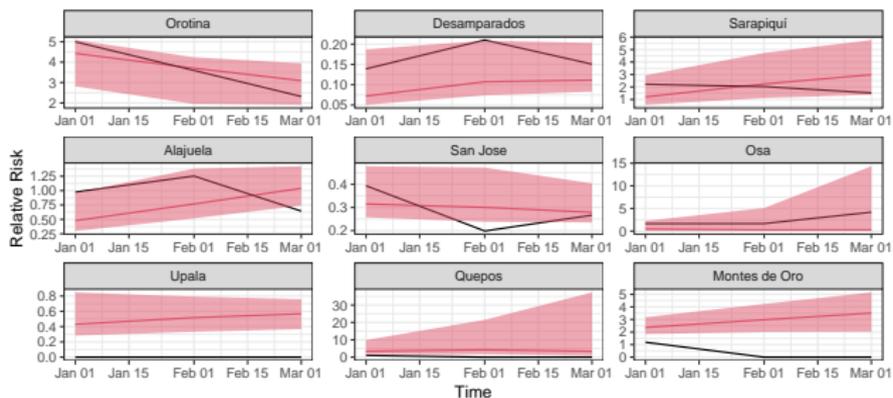


Figura 5: Comparación de pronósticos durante el periodo de prueba (2021). Los seis paneles superiores muestran los mejores cantones según la métrica NIS. Los tres paneles inferiores muestran los peores cantones según la métrica NIS.

Contenidos

- 1 **Introducción**
- 2 **Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas**
 - Datos
 - Modelo para cada cantón
 - Entrenamiento del modelo
 - Predicción
 - Resultados
 - **Modelo espacio-temporal**
 - Metodología
 - Resultados
- 3 **Emulador espacio-temporal climático (downscaling)**
 - Métodos de aproximación
- 4 **Conclusiones**

Metodología

Para cada cantón i y el tiempo t :

$$Y_{it} | \mu_{it}, \kappa \sim \text{NegBin}(\mu_{it}, \kappa)$$

donde

$$\log(\mu_{it}) = \log(E_{it}) + \log(RR_{it})$$

$$\begin{aligned} \log RR_{it} = & \alpha + f_1(RR_t) + f_2(P_t) + f_3(S_t) \\ & + f_4(N_t) + f_5(L_t) + f_6(TN_t) + f_7(M_t) \\ & + \phi_{i,(month)} + \theta_{i,(year)}, \end{aligned}$$

$\phi_{i,(month)} - \phi_{i,(month-1)} \sim N(0, \sigma_\phi^2)$, y

$f_k, k = 1, \dots, 7$ es la estructura de DLNM aplicada desde el rezago 3 hasta el 12.

Metodología

- Para el efecto espacial, se definen dos tipos de matriz de proximidad W :
 - 1 **La matriz de vecinos** usual se define como $W = \{W\}_{ij} = 1$ si los municipios i y j son vecinos y 0 en caso contrario.
 - 2 **Una matriz de distancia alternativa** basada en la distancia de la carretera principal en kilómetros entre el centro de cada par de municipios, es decir, $W = \{W\}_{ij} = 1$ si la distancia es menor que la mediana general y 0 en caso contrario. Incorporamos esta distancia para proporcionar una forma más realista de medir la proximidad entre las dinámicas sociales.

Metodología

- Para el efecto espacial estructurado, se define el modelo autorregresivo condicional instrínseco (CAR):

$$\theta_{i,(year)} | \theta_{j,(year)}, \tau_{\theta} \sim N \left(\frac{1}{n_i} \sum_{j \sim i} \theta_{j,(year)}, \frac{1}{\tau_{\theta} n_i} \right),$$

donde τ_{θ} es la precisión condicional, $j \sim i$ denota que $\mathbf{W}_{ij} = 1$, y n_i es el número de vecinos según la definición de la matriz de proximidad.

- En resumen, 4 estructuras espaciales fueron implementadas:
 - 1 Independencia.
 - 2 CAR.
 - 3 CAR propia: agregando un valor positivo d a n_i .
 - 4 Besag-York-Mollie (BYM): incluye el efecto aleatorio no estructurado.

Resultados

Cuadro 5: Comparación de los modelos según el criterio de información de devianza (DIC) y log score de validación cruzada (CV log-score)

DLNM	Matriz de proximidad	Estructura espacial	DIC	CV log-score
Lineal*	Vecino	Independiente	57135.37	3.8710
		CAR	54256.47	3.6872
		proper CAR	52628.40	3.5774
	Distancia	BYM	52632.24	3.5784
		CAR	53416.92	3.6264
		proper CAR	52633.29	3.5787
No lineal*	Vecino	BYM	52636.92	3.5787
		Independiente	53429.63	3.8756
		CAR	50640.66	3.6838
	Distancia	proper CAR	49438.81	3.5954
		BYM	49461.01	3.5977
		CAR	54674.34	3.9653
	Distancia	proper CAR	49468.89	3.5985
		BYM	49456.27	3.5971

* El mejor modelo para cada especificación DLNM está marcado en negrita.

Resultados

Cuadro 6: Métricas predictivas del conjunto de datos de entrenamiento y prueba del modelo seleccionado.

Cantón	Datos de entrenamiento				Datos de prueba			
	Independiente		CAR propia		Independiente		CAR propia	
	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> ₉₅	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> _{0,05}	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> _{0,05}	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> _{0,05}
Alajuela	0.7815	14.5297	0.3982	5.3710	0.0750	1.0905	0.0416	1.6417
Alajuelita	0.3090	23.2238	0.2175	13.1177	0.4515	22.8135	0.0515	2.0922
Atenas	4.6100	24.7736	2.5706	10.1453	5.1453	87.6173	0.3283	10.2199
Cañas	10.1008	24.3243	5.7069	12.3277	5.8803	60.7800	0.4829	6.8129
Carrillo	4.3786	15.9598	3.5404	9.1421	0.9860	13.2041	0.4175	2.5945
Corredores	5.0620	25.1830	2.5155	8.6126	1.6824	17.0115	0.5697	1.9358
Desamparados	0.2351	18.6300	0.1466	8.2922	0.0282	3.0978	0.0142	3.0085
Esparza	4.7287	17.4775	2.6296	8.4081	1.1899	16.1291	0.1849	2.1748
Garabito	38.4940	29.0191	5.2545	9.8071	28.8475	232.7807	0.4258	12.9528
Golfo	3.7245	23.5563	1.7734	8.2174	2.0078	35.7736	0.3499	8.5601
Guacimo	1.9057	13.8120	1.0844	4.4132	3.0709	18.1805	2.0633	4.8628
La Cruz	6.2484	26.6755	4.2779	14.3090	6.0351	118.6721	0.5029	14.7439
Liberia	3.6829	23.1675	2.0260	10.2626	4.0913	92.4202	0.5693	16.2507
Limon	2.9640	17.1259	1.6025	6.7593	1.3724	11.2322	0.1034	1.7042
Matina	5.1143	19.9086	2.7162	7.4890	58.0750	192.2903	0.1232	3.0869
Montes de Oro	5.9220	21.8260	4.1289	12.2332	11.4909	126.5836	1.2106	19.5139
Nicoya	2.8036	20.5059	2.0672	10.1305	3.6262	101.6524	0.1894	10.2497
Orotina	13.7161	17.5376	4.0681	6.0472	1.0599	6.7613	0.4888	1.5221
Osa	5.9295	33.7053	4.2208	17.2559	1.1235	13.0806	0.5758	1.7891

Resultados

Cuadro 7: Métricas predictivas del conjunto de datos de entrenamiento y prueba del modelo seleccionado.

Municipality	Datos de entrenamiento				Datos de prueba			
	Independiente		CAR propia		Independiente		CAR propia	
	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> ₉₅	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> _{0,05}	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> _{0,05}	<i>NRMSE</i>	<i>NIS</i> _{0,05}
Parrita	$1,24 \times 10^9$	24483.9181	13.7622	9.8340	4.4446	46.3670	0.6773	7.9705
Perez Zeledón	2.0103	30.0358	0.8733	9.4268	1.2543	20.3380	0.1783	1.3942
Pococí	2.2524	12.7658	1.3001	6.1328	1.0524	12.0212	0.1284	1.8534
Puntarenas	1.5802	12.8416	0.9303	4.6933	1.3263	23.9665	0.1646	1.7646
Quepos	56.8344	37.6499	10.0908	12.9868	36.9331	257.7509	1.1780	23.2153
San Jose	0.2105	12.6814	0.1328	5.2650	0.0215	1.2409	0.0155	2.3248
Santa Ana	0.7837	21.9311	0.5860	12.6213	0.6759	43.5264	0.3576	15.4854
SantaCruz	35.1198	37.3329	8.4762	12.7070	6.5905	91.5896	0.3027	3.0635
Sarapiquí	7.9218	22.2392	2.8096	6.9807	0.3880	4.9820	0.1047	1.9942
Siquirres	2.1184	13.9371	1.4077	6.6140	2.7214	19.0646	0.3564	1.7977
Talamanca	4.9193	21.1751	2.2374	8.0522	0.1113	0.7642	0.7989	1.3152
Turrialba	2.5905	25.2386	1.9572	15.8268	1.0122	20.0694	0.2614	1.8489
Upala ¹	1.2744	21.7159	0.9203	12.2963	-	-	-	-

¹ *NRMSE* y *NIS*_{0,05} de los datos de prueba de Upala no se muestran porque los riesgos relativos observados son ceros.

Resultados

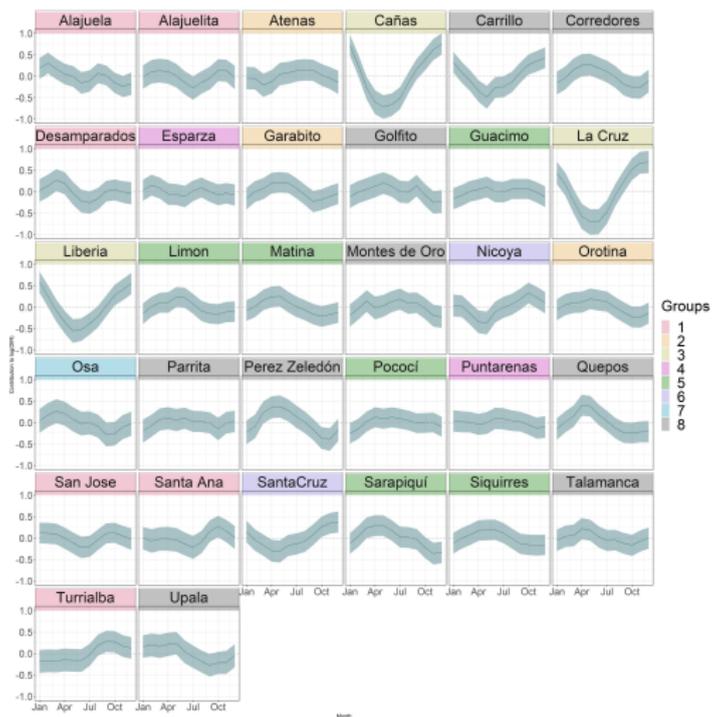


Figura 6: Media posterior y intervalo creíble del 95 % de los efectos aleatorios mensuales de cada cantón.

Resultados



Figura 7: Ilustración de 8 grupos con un comportamiento temporal similar.

Resultados

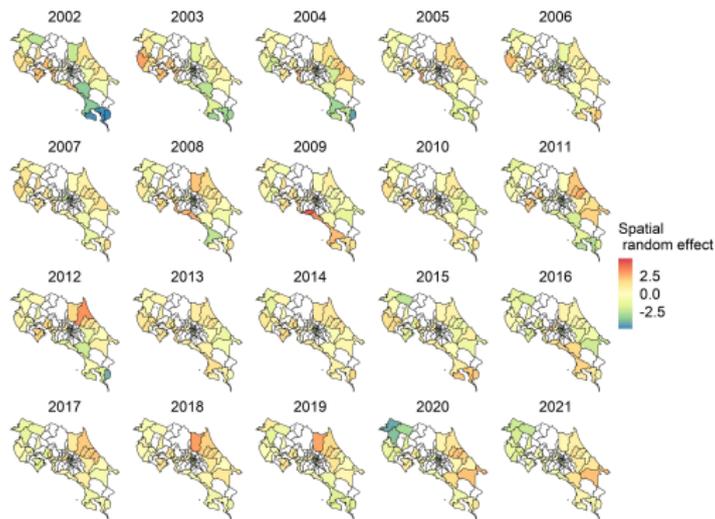


Figura 8: Contribución del efecto aleatorio espacial de cada año al log riesgo relativo del dengue.

Resultados

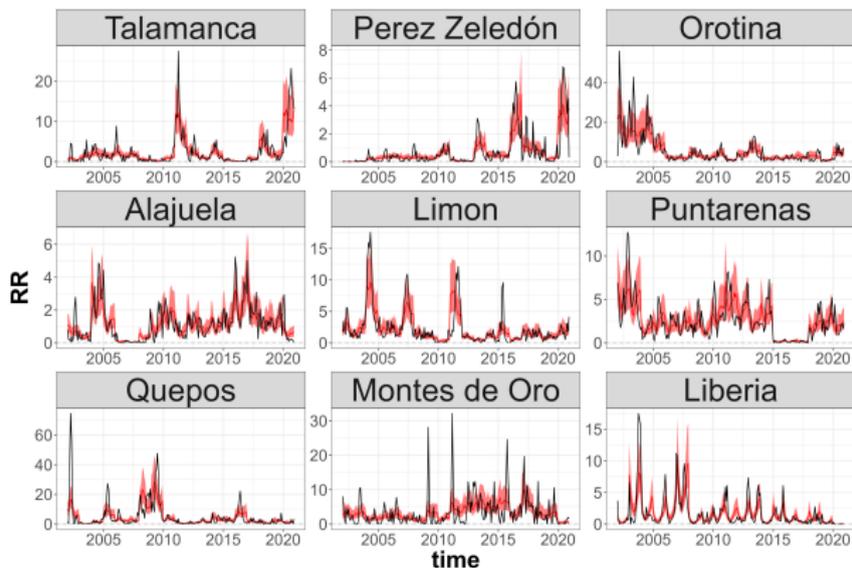


Figura 9: Comparación durante el período de ajuste. Los seis paneles superiores muestran los mejores cantones según la métrica NIS. Los tres paneles inferiores muestran los peores cantones según la métrica NIS. La línea roja representa el RR observado, mientras que la línea azul representa el RR estimado.

Resultados

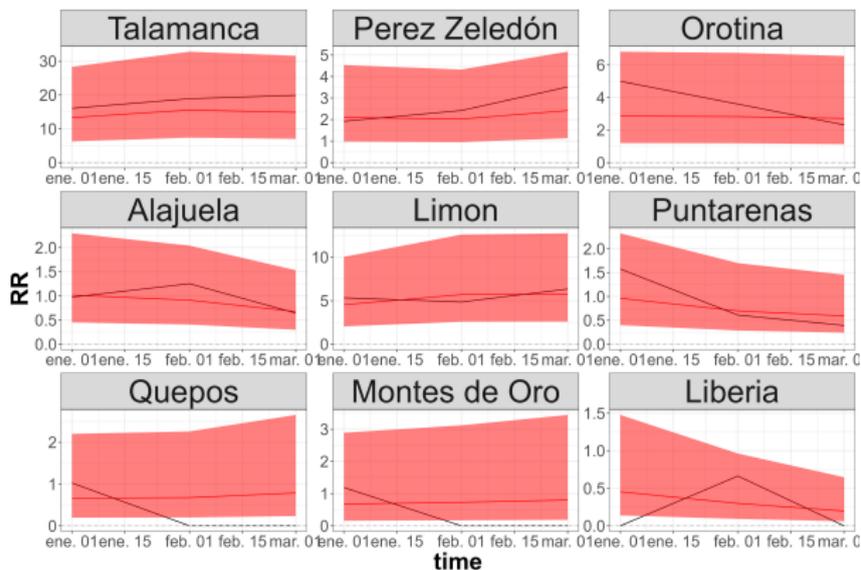


Figura 10: Comparación de pronósticos durante el período de prueba (2021). Los seis paneles superiores muestran los mejores cantones según la métrica NIS. Los tres paneles inferiores muestran los peores cantones según la métrica NIS.

Resultados

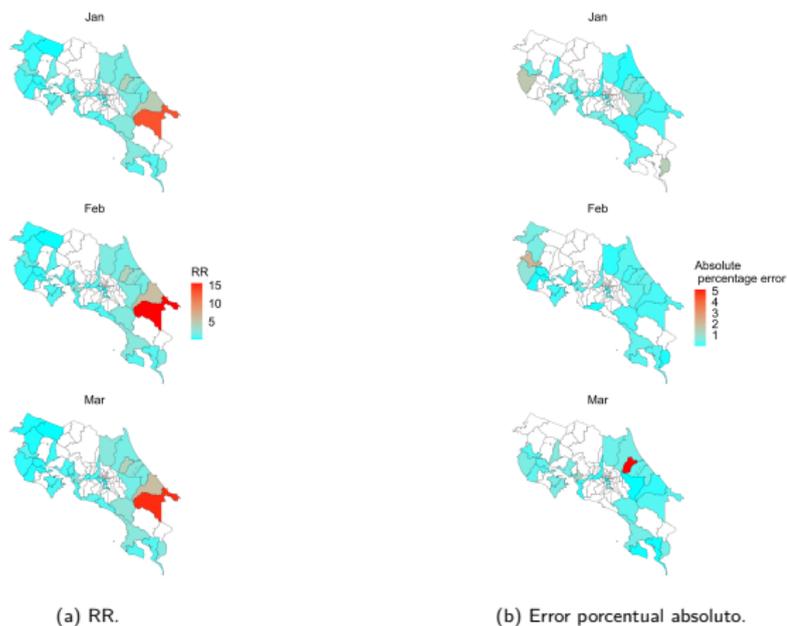


Figura 11: Predicción del riesgo relativo y su error porcentual absoluto desde enero hasta marzo de 2021.

Contenidos

1 Introducción

2 Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas

- Entrenamiento del modelo
- Predicción
- Resultados
- Metodología
- Resultados

3 Emulador espacio-temporal climático (downscaling)

- Preliminares
- Metodología
 - Métodos de aproximación
- Resultados

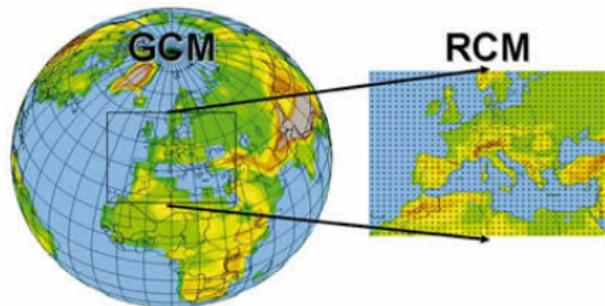
4 Conclusiones

Preliminares

- Barboza, L. A., Chou-Chen, S. W., Córdoba, M. A. Alfaro, E. J., & Hidalgo, H. G (en prensa). **Spatio-temporal Downscaling Emulator for Regional Climate Models: a Comparative Study.** Environmetrics.
- Modelos climáticos como posible *input* para modelos epidemiológicos.

Preliminares

- **Modelos Climáticos Regionales (RCM)**: describen la dinámica atmosférica y oceánica global. Modelos de reducción de escala que utilizan como entrada **un Modelo de Circulación General (GCM)**.
- Evaluación de los impactos del cambio climático y predicciones estacionales.
- Demanda computacional alta. (Wilby y Wigley, 1997)
- **Emulador estadístico**: aproximación de reducción de escala de la salida de RCM. (O'Hagan, 2006; Castruccio et al, 2014; Overstall y Woods, 2016)



Objetivo

- Construir un emulador estadístico de reducción de escala de un modelo RCM, utilizando un enfoque espacio-temporal de coeficientes variables.
- Los resultados climáticos de mayor resolución son una barrera para muchas aplicaciones: modelos estadísticos/matemáticos epidemiológicos.

Contenidos

1 Introducción

2 Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas

- Entrenamiento del modelo
- Predicción
- Resultados
- Metodología
- Resultados

3 Emulador espacio-temporal climático (downscaling)

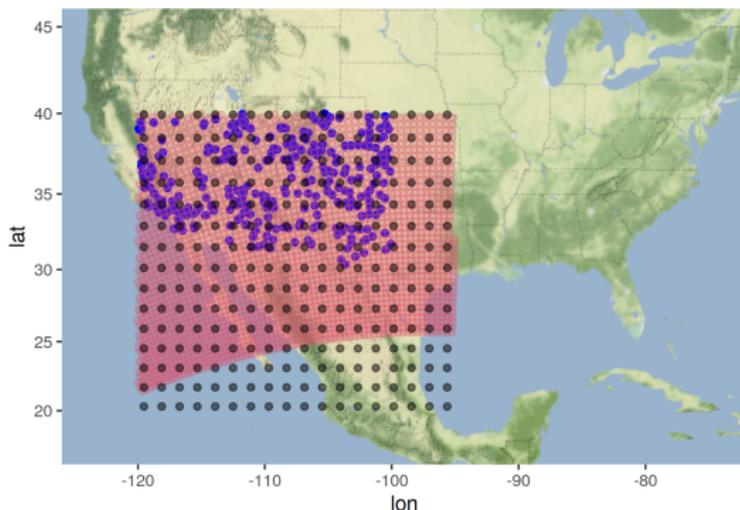
- Preliminares
- **Metodología**
 - Métodos de aproximación
- Resultados

4 Conclusiones

Datos

- North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP).
- Generación de escenarios climáticos para su uso en investigación de impactos.
- **RCM:** Modelo Climático Regional Canadiense (CRCM):
 - Temperatura (grados Kelvin)
- **GCM:** Modelo de Sistema Climático Comunitario (CCSM):
 - Temperatura (grados Kelvin)
 - Velocidad vertical media de la presión estacional (PA/s) (OMEGA).
- **Datos observados:** Registros de temperatura del aire en superficie observados del the National Climatic Data Center (NCDC). Base de datos llamada como DSI-3200.
- Diferentes resoluciones espaciales. Resolución temporal común.

Resolución de datos



- RCM (puntos rojos), GCM en la Región de América del Norte (puntos negros) y temperaturas observadas (puntos azules).
- Intersección entre el dominio de NARCCAP (Norteamérica) y el área de Monzón. Estudios futuros sobre el impacto del Monzón sobre América Central.
- 2482 puntos (RCM), 270 (GCM). Mensual en el tiempo.

Comportamiento variando en el espacio

- Sea $C_t(s)$, $s \in \mathcal{S}$ la variable observada del Modelo Global y $C_t(w)$, $w \in \mathcal{W}$ la variable observada del Modelo Regional.
- Comportamiento de

$$Y_t(s) = \ln C_t(s) - \ln C_t(w)$$

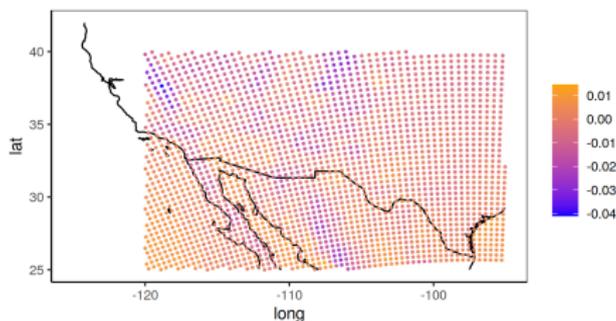
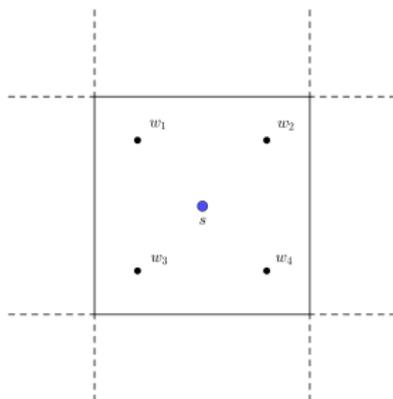


Figura 12: Diferencia de log-temperatura (regional vs global).

Modelo emulador

- Dos conjuntos espaciales: \mathcal{S} (más grueso) y \mathcal{W} (más fino).
- Rejillas regulares en ambos conjuntos.
- Cada ubicación $s \in \mathcal{S}$ es el centro de una región regular que contiene varios puntos sobre \mathcal{W} .



Modelo emulador

- Modelo **Global**:

$$C_t(s) = \alpha + \beta' X_t(s) + \epsilon_t(s)$$

α y β son parámetros aleatorios y $\epsilon_t(s)$ es ruido blanco en espacio y tiempo.

- Modelo **Regional**:

$$C_t(w) = [\alpha + \alpha_t^r(w)] + [\beta + \beta_t^r(w)]' X_t(s) + [\epsilon_t(s) + \gamma_t(w)]$$

donde

- $\alpha_t^r(\cdot) \sim N(\beta_0, \Sigma_0(\theta_0))$,
- $\beta_t^r(\cdot) \sim N(\beta_1, \Sigma_1(\theta_1))$ y
- $\gamma_t(\cdot) \stackrel{i.i.d}{\sim} N(0, \tau^2)$

y Σ_0 y Σ_1 son matrices de covarianza espacio-temporal separable.

Modelo emulador

- Modelo espacio-temporal de coeficientes variables:

$$Y_t(w) := C_t(w) - C_t(s) = \alpha_t^r(w) + \beta_t^r(w)'X_t(s) + \gamma_t(w)$$

- Enfoque bayesiano:

$$\mathbf{Y}|\Phi \sim N(\beta_0 + \mathbf{X}^T \beta_1, \Sigma_Y)$$

- Evaluación del inverso y determinante de Σ_Y (que consume mucho tiempo). Consideraremos dos métodos de aproximación para evitar este problema.

Métodos de aproximación

1 Enfoque de Dambon (*varycoef*)

- Aproximación de la verosimilitud (Dambon et al., 2021).
- Independencia previa mutua en parámetros aleatorios.
- *tapering* en estructuras de covarianza.

2 Integrated Nested Laplace Approximation (*INLA*)

- Aproximación Gaussiana de la verosimilitud bajo modelos más generales (modelos lineales generalizados con variables latentes). (Rue et al, 2009; Blangiardo et al, 2013.)
- Diseñado para reducir el tiempo de cálculo de modelos espaciales y/o temporales.
- Se hicieron varias simulaciones y se confirmó que INLA es más efectivo en tiempo de ejecución y precisión.

Contenidos

1 Introducción

2 Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas

- Entrenamiento del modelo
- Predicción
- Resultados
- Metodología
- Resultados

3 Emulador espacio-temporal climático (downscaling)

- Preliminares
- Metodología
 - Métodos de aproximación
- Resultados

4 Conclusiones

Emulador para datos de NARCCAP

- \mathcal{W} : resolución del RCM, \mathcal{S} : resolución del GCM.
- $C_t(\cdot) = \log T_t(\cdot)$, donde T_t es la temperatura.
- $X_t(\cdot) = OMEGA_t(\cdot)$. Tasa de ascenso vertical de las parcelas de aire. Proporciona una medida de los movimientos ascendentes y descendentes a gran escala en la atmósfera.
- Aproximación INLA con datos de entrenamiento de 1990-1998 (mensuales) y datos de prueba de 1999.
- Priors de Complejidad Penalizada (PC prior) para los parámetros autoregresivos y de varianza (efecto aleatorio).

Emulador para datos de NARCCAP

Modelo 0: intercepto constante.

Modelo 1: Intercepto espaciotemporal variable que sigue un proceso aleatorio de ruido con la estructura de covarianza espacial sigue una Matern($\nu = 1$).

$$\begin{cases} Y_t(w) &= \alpha_t(w) + \gamma_t(w) \\ \alpha_t(w) &= \epsilon_t(w) \end{cases}$$

Modelo 2: Intercepto espaciotemporal variable que sigue un proceso $AR(1)$, donde la estructura de covarianza espacial sigue una Matern($\nu = 1$).

$$\begin{cases} Y_t(w) &= \alpha_t(w) + \gamma_t(w) \\ \alpha_t(w) &= \rho\alpha_{t-1}(w) + \epsilon_t(w) \end{cases}$$

Modelo 3: Intercepto espaciotemporal variable que sigue un proceso $AR(1)$ con la estructura de covarianza espacial sigue una Matern con una covariable:

$$\begin{cases} Y_t(w) &= \alpha_t(w) + \beta \cdot \text{OMEGA}_t(w) + \gamma_t(w) \\ \alpha_t(w) &= \rho\alpha_{t-1}(w) + \epsilon_t(w) \end{cases}$$

Emulador para datos de NARCCAP

Cuadro 8: Comparación de modelos según las métricas predictivas (1990-1998: período de entrenamiento, 1999: período de prueba) y tiempo transcurrido en minutos.

	RCM	Modelo 0		Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3	
Año	MSE	MSE	$IS_{,95}$	MSE	$IS_{,95}$	MSE	$IS_{,95}$	MSE	$IS_{,95}$
1990	28.96	23.23	108.48	29.21	145.11	29.01	146.20	29.02	146.22
1991	32.07	18.98	96.64	32.16	153.97	31.94	155.17	31.93	155.18
1992	29.35	29.96	129.75	29.72	147.84	29.50	148.91	29.50	148.93
1993	28.28	28.87	128.90	28.77	138.62	28.55	139.78	28.56	139.82
1994	28.31	29.84	127.32	28.78	141.38	28.56	142.64	28.57	142.67
1995	23.56	24.49	110.77	23.86	128.43	23.67	129.60	23.66	129.61
1996	39.79	29.87	130.64	39.98	172.70	39.77	174.02	39.78	174.04
1997	23.88	20.76	97.22	24.29	128.93	24.10	129.99	24.10	129.99
1998	24.52	15.39	78.82	24.79	129.84	24.61	130.96	24.61	131.01
1999	29.41	38.38	149.91	37.85	36.52	40.32	40.42	40.78	41.17
Tiempo ejec.	-	2.87		9.69		36.55		36.57	

Emulador para datos de NARCCAP

Cuadro 9: Estimaciones de parámetros e intervalo de predicción para el mejor escenario (Mod 1).

	L. inf. 95 %	Estimate	L.sup. 95 %
β_0	-0.00238	-0.00166	-0.00094
ϕ	7.2622	7.4539	7.6463
σ	0.0152	0.0155	0.0157
τ	0.00001977	0.00001989	0.00002001

Emulador para datos de NARCCAP

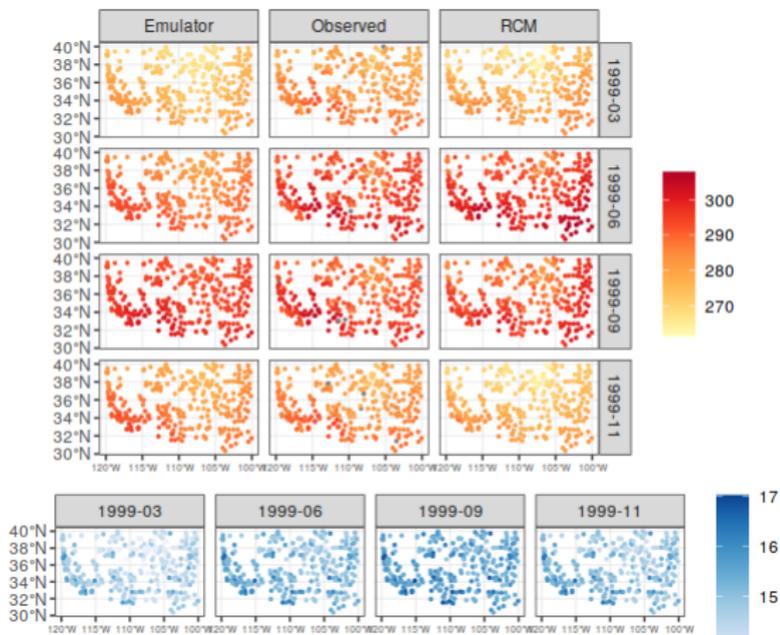


Figura 13: Paneles superiores: temperaturas estimadas según el Modelo 1 (emulador), temperaturas observadas y RCM. Panel inferior: rango intercuartil para cuatro meses seleccionados durante el período de prueba. Los valores faltantes se muestran en gris.

Contenidos

- 1 **Introducción**
- 2 **Modelos predictivos de riesgos de dengue con variables climáticas**
 - Datos
 - Modelo para cada cantón
 - Entrenamiento del modelo
 - Predicción
 - Resultados
 - Modelo espacio-temporal
 - Metodología
 - Resultados
- 3 **Emulador espacio-temporal climático (downscaling)**
 - Preliminares
 - Metodología
 - Métodos de aproximación
 - Resultados
- 4 **Conclusiones**

Conclusiones

- Implementación de un modelo GAMLSS y RF utilizando diferentes variables climáticas para predecir el riesgo relativo de dengue en 32 cantones de mayor riesgo en este estudio.
- Modelos bayesianos espacio-temporales (INLA).
- La capacidad predictiva de estos métodos permite una vigilancia más exhaustiva y la identificación temprana de posibles brotes, lo que nos permite detectar brotes tempranamente, reduciendo el impacto social y económico.
- Trabajo futuro:
 - Más modelos espacio-temporales.
 - Más fuentes de datos como entrada (e.g. factores sociales)
 - Exploración de otros métodos de aprendizaje automático (NN y RNN).

Conclusiones

- **Modelo jerárquico:**

$$\begin{cases} RR_t(w) & \sim C_t(w) + \text{Social/Climatic Factors}_t(w) \\ C_t(w) & = C_t(s) + \alpha_t(w) + \gamma_t(w) \\ \alpha_t(w) & = \rho\alpha_{t-1}(w) + \epsilon_t(w) \end{cases}$$

- **Ventajas:**

- Tiempo de computación: ajuste y muestreo.
- Propiedades de downscaling (reducción de escala).
- Pronóstico espacio-temporal.

Muchas gracias por su atención!

Shu Wei Chou-Chen

email: shuwei.chou@ucr.ac.cr

website: <https://shuwei325.github.io/>



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

EEs Escuela de
Estadística

CIMPA

Centro de Investigación en
Matemática Pura y Aplicada

