

---

# RESEARCH STATEMENT: MODELAMIENTO JERÁRQUICO BAYESIANO ESPACIO-TEMPORAL DEL IMPACTO DE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS EN EL RENDIMIENTO AGRÍCOLA DEL SUR DEL PERÚ (2022-2024)

---

Aldair Maquera

October 21, 2025

## 1 Introducción

El Perú es reconocido como el tercer país más vulnerable al cambio climático; el sur peruano no es ajeno a este hecho, conformado por los departamentos de Tacna, Moquegua, Arequipa y Puno, concentra aproximadamente el 40% de la producción agrícola nacional y sustenta la seguridad alimentaria de más de 2.3 millones de familias rurales [1]. Esta región enfrenta creciente vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos: sequías, heladas, lluvias intempestivas y friaje pueden reducir rendimientos entre 20-60% según cultivo [2, 3], mientras el retroceso glaciar del 40% en los Andes [4, 5] y fenómenos El Niño/La Niña generan pérdidas anuales cercanas a USD 3,400 millones [6].

A pesar de diversas prácticas adaptativas implementadas, no existe evidencia cuantitativa robusta sobre cuáles prácticas son efectivamente protectoras contra eventos climáticos específicos ni cómo esta efectividad varía espacial y temporalmente [7, 8]. La diversidad geográfica genera vulnerabilidades desiguales que análisis nacionales no logran reflejar, faltando información desagregada mientras modelos tradicionales ignoran dependencia espacial o reducen incertidumbre a simples promedios [9, 10].

Los modelos jerárquicos bayesianos espacio-temporales ofrecen alternativa poderosa: permiten identificar clusters vulnerabilidad, incorporar estructuras vecindad, integrar dinámicas temporales, manejar datos incompletos y cuantificar incertidumbre realísticamente [11, 12, 10]. Esta investigación propone, por primera vez, aplicar el modelo BYM2 una extensión escalable de modelos espaciales bayesianos— al sector agrícola peruano, aportando evidencia metodológica y empírica inédita [13, 14].

## 2 Planteamiento del Problema

La ausencia de modelos predictivos que integren explícitamente la estructura espacial, temporal y jerárquica de impactos climáticos en agricultura andina del sur peruano impide diseño de políticas públicas basadas en evidencia y asignación eficiente de recursos para adaptación climática. Este problema central se manifiesta en cuatro dimensiones: (i) heterogeneidad espacial no modelada que oculta variabilidad crítica entre distritos vecinos [15]; (ii) dependencia temporal ignorada con efectos rezago no capturados [16]; (iii) efectividad diferencial de prácticas no cuantificada según contexto espacial y evento [17]; (iv) autocorrelación espacial omitida generando estimaciones sesgadas [18].

Las consecuencias incluyen políticas ineficientes sin consideración heterogeneidad espacial, asignación subóptima recursos, falta orientación basada evidencia para productores, y vulnerabilidad persistente por incapacidad sistemática reducir exposición climática.

## 3 Objetivos

### General

Analizar cómo eventos climáticos extremos afectan rendimiento agrícola a través del tiempo y espacio en sur del Perú, identificando prácticas agrícolas que mitiguen estos efectos mediante correlación espacial explícita y tendencias temporales.

### Específicos

- Cuantificar la magnitud del impacto de eventos climáticos específicos (sequías, heladas, bajas temperaturas, lluvias intempestivas, friaje) sobre

los rendimientos, controlando los efectos espaciales, temporales y del cultivo.

- Determinar las prácticas agrícolas (terrazas, uso de materia orgánica, rotación de cultivos, uso de semilla certificada, determinación de necesidades de agua) con mayor efectividad protectora según el tipo de evento y el contexto agroecológico.
- Mapear los patrones espaciotemporales de vulnerabilidad considerando la autocorrelación espacial entre distritos.
- Generar mapas de vulnerabilidad y de efectividad de prácticas como herramientas para la toma de decisiones en políticas públicas a nivel subnacional.

## 4 Preguntas de Investigación

### Central

¿Cómo eventos climáticos extremos afectan diferencialmente rendimiento agrícola través espacio y tiempo en sur del Perú, y cuáles prácticas agrícolas mitigan efectivamente estos impactos considerando heterogeneidad espacial y temporal?

### Específicas

1. ¿Cuál es la magnitud y dirección del impacto de cada evento climático extremo sobre el rendimiento agrícola, y cómo varía entre departamentos, altitudes y cultivos?
2. ¿Qué prácticas demuestran mayor efectividad protectora contra eventos específicos y cómo varía dicha efectividad espacial y temporalmente?
3. ¿Existen *clusters* espaciales de vulnerabilidad persistentes en el tiempo, y qué características los determinan?
4. ¿Cómo interactúan los eventos climáticos con las prácticas agrícolas y las características regionales en la determinación del rendimiento final?

### Hipótesis

Los impactos exhiben fuerte autocorrelación espacial y dependencia temporal, más severos en zonas mayor altitud para heladas y friaje, zonas menor precipitación para sequías. Prácticas como terrazas y manejo agua mostrarán mayor efectividad contra eventos hídricos, materia orgánica contra variabilidad térmica. Existirán clusters espaciales persistentes alta y baja vulnerabilidad no correspondientes divisiones administrativas, reflejando factores agroecológicos subyacentes.

## 5 Metodología Propuesta

**Diseño:** Estudio observacional longitudinal estructura jerárquica usando framework bayesiano espacio-temporal.

**Datos:** ENA del INEI-Perú (2022-2024): CARAT-ULA.sav (ubicación-factores expansión), CAP200AB.sav (producción-superficie), CAP200B\_1.sav (pérdidas climáticas), CAP300AB.sav (prácticas agrícolas) [19]. Ámbito: 4 departamentos sur. Muestra: ~15,000 observaciones georeferenciadas.

### Variables:

- **Respuesta:** Rendimiento = (P219\_CANT\_1+P219\_CANT\_2)/P217\_SUP\_ha
- **Climáticas:** P223A, P223B\_1 (sequía), P223B\_2 (bajas temp), P223B\_3 (heladas), P223B\_5 (friaje), P223B\_6 (lluvias), P212 (agua)
- **Prácticas:** P301A\_2 (mat.org), P301A\_3 (rotación), P301A\_4 (terrazas), P301A\_9 (agua), P214 (semilla)
- **Control:** P204\_COD (cultivo), P208 (conducción)
- **Estructurales:** CCDD, CCDI, ANIO, LAT, LONG, FACTOR\_PROD

### Modelo BYM2:

$$\text{Rendimiento}[i, j, k, t] \sim N(\mu[i, j, k, t], \sigma^2) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu[i, j, k, t] = & \alpha + \sum_{c=1}^5 \beta_c \text{Clima}_c[i, t] \\ & + \sum_{p=6}^{10} \beta_p \text{Práctica}_p[i] \\ & + \sum_{cp} \beta_{cp} \text{Clima}_c \times \text{Práctica}_p \\ & + u_j + v_k + w_t + \phi_k + f(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:  $u_j \sim N(0, \sigma_u^2)$ ,  $v_k \sim N(0, \sigma_v^2)$ ,  $w_t \sim N(0, \sigma_w^2)$ ,  $\phi_k \sim \text{CAR}(W, \tau^2, \alpha)$ ,  $f(t) \sim \text{GP}(0, K)$ .

**Software:** brms/Stan, CARBayes, sf/spdep [20, 21]. 4 cadenas, 6000 iter.

**Priors:**  $\beta \sim N(0, 2.5)$ ,  $\sigma^2 \sim \text{IG}(1, 1)$ ,  $\tau^2 \sim \text{IG}(1, 0.01)$ .

**Validación:**  $\hat{R} < 1.01$ , ESS > 400, LOO-CV, Test Moran I residuos no significativo.

## 6 Impacto y Proyección

**Contribución Metodológica:** Primer modelo CAR aplicado sistemáticamente vulnerabilidad climática agrícola contexto andino [22, 23]. Integración pionera estructura jerárquica (distrito-departamento-año) con correlación espacial explícita. Framework replicable otros países andinos constituyendo avance significativo modelado bayesiano espacio-temporal agricultura. Desarrollo especificación combinando efectos aleatorios jerárquicos, CAR y Gaussian Process framework coherente [24, 25].

**Contribución Empírica:** Cuantificación rigurosa prácticas efectivamente protectoras contra eventos climáticos específicos, identificación interacciones clima×práctica×región previamente no documentadas, baseline empírico evaluación futura programas adaptación [1]. Mapeo alta resolución vulnerabilidad nivel distrital, identificación clusters alta/baja resiliencia no evidentes análisis agregados, tipología contextos agroecológicos según patrón vulnerabilidad [26].

**Productos y Análisis:** (1) Mapas vulnerabilidad climática por distrito y año, series temporales impacto por departamento, mapas efectividad prácticas mitigadoras, superficies predicción espacial, animaciones temporales 2022-2024; (2) Intervalos credibilidad 95% todos coeficientes, probabilidades posteriores efectividad prácticas, efectos marginales por región y cultivo, predicciones out-of-sample validación cruzada, rankings departamentos vulnerabilidad; (3) Descomposición varianza (cuánto explica espacio vs tiempo), contribución relativa cada evento climático por región, escenarios contrafactuales (rendimiento sin eventos extremos), análisis costo-beneficio adopción prácticas mitigadoras [6, 27].

**Impacto Política Pública:** Inmediato (1-2 años): mapas vulnerabilidad priorización programas MIDAGRI, recomendaciones específicas prácticas por zona agroecológica gobiernos regionales, sistema alerta temprana basado predicciones espacialmente explícitas, criterios focalización mejorados programas asistencia técnica. Mediano plazo (2-3 años): asignación eficiente recursos adaptación basada evidencia efectividad diferencial, diseño incentivos adopción prácticas según contexto específico, evaluación costo-beneficio intervenciones por zona geográfica, base técnica negociación financiamiento climático internacional [28, 8].

**Escalabilidad:** Replicación otras regiones peruanas (norte, selva) adaptaciones menores, aplicación países andinos similares (Bolivia, Ecuador, Colombia), transferencia contextos agricultura montaña globalmente. Extensión temática: adaptación otros cultivos y sistemas productivos, integración modelos cambio uso suelo, vinculación análisis seguridad alimentaria nutricional.

**Cronograma:**

Semanas	Actividades
2-3	Obtención de datos ENA 2022-2024
3-4	Preparación y limpieza: construcción matriz adyacencia espacial, manejo datos faltantes
2	Análisis exploratorio: estadísticas descriptivas, mapas exploratorios
4-5	Modelado bayesiano: especificación BYM2, tuning hiperparámetros, runs MCMC, diagnósticos convergencia
2	Validación: posterior predictive checks, análisis residuos espaciales
3-4	Interpretación y reporte: generación mapas, cálculo efectos marginales, redacción resultados

**Total: 12-15 semanas.** La investigación generará evidencia cuantitativa robusta para mejorar resiliencia climática agrícola en la región más vulnerable del país.

**References**

[1] World Bank. Climate-smart agriculture in peru. Technical report, World Bank Climate Knowledge Portal, 2019. URL <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/sites/default/files/2019-06/CSA-in-Peru.pdf>.

[2] Jessica Huamán, Cecilia Gianella, and Sandra Llosa. Climate change, power, and vulnerabilities in the peruvian highlands. *Regional Environmental Change*, 21(4):109, 2021. doi:10.1007/s10113-021-01825-8.

[3] Heleene Tambet and Yaniv Stopnitzky. Climate adaptation and conservation agriculture among peruvian farmers. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(3):900–922, 2021. doi:10.1111/ajae.12177.

[4] Fabian Drenkhan, Mark Carey, Christian Huggel, Jochen Seidel, and Maria Teresa Oré. The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the andes of peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6):715–733, 2015. doi:10.1002/wat2.1105.

[5] Bryan G. Mark, Jeffrey Bury, Jeffrey M. McKenzie, Adam French, and Michel Baraer. Climate change and tropical andean glacier recession: Evaluating hydrologic changes and livelihood vulnerability in the cordillera blanca, peru. *Annals of the Association of American Geographers*, 100(4):794–805, 2010. doi:10.1080/00045608.2010.497369.

[6] International Institute for Sustainable Development. Climate risk management for agriculture in peru: Focus on the regions of junín and piura. Technical report, IISD, 2020. URL <https://www.iisd.org/publications/report/climate-risk-management-agriculture-peru-focus-region>.

[7] Laura V. Rasmussen, Ana Carolina Chávez-Tafur, Daniel Morales-Santos, Muni Muñoz, Pablo Ramírez, Javier Castañeda, and Cesar Vargas. Climate change perceptions and adaptation strategies: A mixed methods study with subsistence farmers in rural peru. *Sustainability*, 14(23):16015, 2022. doi:10.3390/su142316015.

[8] Mark Carey, Christian Huggel, Jeffrey Bury, Cesar Portocarrero, and Wilfried Haeberli. An integrated socio-environmental framework for climate change adaptation and glacier hazard management: lessons from lake 513, cordillera blanca, peru. *Climatic Change*, 112:733–767, 2012. doi:10.1007/s10584-011-0249-8.

[9] Mariana Vidal Merino, Diana Sietz, Frank Jost, and Uta Berger. The andean farmers of peru: Farm-household system vulnerability to climate-related hazards. *Climate Change Management*, pages 1053–1076, 2020. doi:10.1007/978-3-030-37425-9\_53.

[10] Wolfgang Gurgiser, Irmgard Juen, Katrin Singer, Martina Neuburger, Simone Schauwecker, Mathias Hofer, and Georg Kaser. Comparing peasants’

- perceptions of precipitation change with precipitation records in the tropical callejón de huaylas, peru. *Earth System Dynamics*, 7:499–515, 2016. doi:10.5194/esd-7-499-2016.
- [11] Andrea Riebler, Sigrunn H. Sørbye, Daniel Simpson, and Håvard Rue. An intuitive bayesian spatial model for disease mapping that accounts for scaling. *Statistical Methods in Medical Research*, 25(4):1145–1165, 2016. doi:10.1177/0962280216660421.
  - [12] Mitzi Morris, Katherine Wheeler-Martin, Dan Simpson, Stephen J. Mooney, Andrew Gelman, and Charles DiMaggio. Bayesian hierarchical spatial models: Implementing the besag york mollié model in stan. *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*, 31:100301, 2019. doi:10.1016/j.sste.2019.100301.
  - [13] Julian Besag, Jeremy York, and Annie Mollié. Bayesian image restoration, with two applications in spatial statistics. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 43:1–20, 1991. doi:10.1007/BF00116466.
  - [14] Nadine Salzmänn, Christian Huggel, Pierluigi Calanca, Jürg Diaz, Anton Huber, and Massimiliano Zappa. Integrated assessment and adaptation to climate change impacts in the peruvian andes. *Advances in Geosciences*, 22:35–39, 2009. doi:10.5194/adgeo-22-35-2009.
  - [15] Johanna Heikkinen. Climate change in the peruvian andes: A case study on small-scale farmers' vulnerability in the quillcay river basin. *Iberoamericana – Nordic Journal of Latin American and Caribbean Studies*, 46(1):77–88, 2017. doi:10.16993/iberoamericana.211.
  - [16] Melissa Dell, Benjamin F. Jones, and Benjamin A. Olken. What do we learn from the weather? the new climate-economy literature. *Journal of Economic Literature*, 52(3):740–798, 2014. doi:10.1257/jel.52.3.740.
  - [17] Junpeng Li, Wanglin Ma, and Huanyu Zhu. A systematic literature review of factors influencing the adoption of climate-smart agricultural practices. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(1):1–38, 2024. doi:10.1007/s11027-024-10115-y.
  - [18] Diana Sietz, Sara Elena Mamani Choque, and Matthias K. B. Lüdeke. Typical patterns of smallholder vulnerability to weather extremes with regard to food security in the peruvian altiplano. *Regional Environmental Change*, 12:489–505, 2012. doi:10.1007/s10113-011-0246-5.
  - [19] Instituto Nacional de Estadística e Informática. Resultados indicadores del sector agrario - encuesta nacional agropecuaria 2023. Technical report, INEI, 2023. URL [https://proyectos.inei.gob.pe/iinei/srienaho/Descarga/DocumentosMetodologicos/2023-62/06\\_RESULTADOS\\_DE\\_LOS\\_INDICADORES\\_DEL\\_SECTOR\\_AGRARIO\\_2023.pdf](https://proyectos.inei.gob.pe/iinei/srienaho/Descarga/DocumentosMetodologicos/2023-62/06_RESULTADOS_DE_LOS_INDICADORES_DEL_SECTOR_AGRARIO_2023.pdf).
  - [20] Håvard Rue, Sara Martino, and Nicolas Chopin. Approximate bayesian inference for latent gaussian models by using integrated nested laplace approximations. *Journal of the Royal Statistical Society*, 71(2):319–392, 2009. doi:10.1111/j.1467-9868.2008.00700.x.
  - [21] Yongjie Zhang, Yan Liu, Stella Watson, and Christopher McMahan. A review of bayesian spatiotemporal models in spatial epidemiology. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(3):97, 2024. doi:10.3390/ijgi13030097.
  - [22] Marshall Burke, Solomon M. Hsiang, and Edward Miguel. Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature*, 527:235–239, 2015. doi:10.1038/nature15725.
  - [23] Wolfram Schlenker and Michael J. Roberts. Non-linear temperature effects indicate severe damages to us crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(37):15594–15598, 2009. doi:10.1073/pnas.0906865106.
  - [24] David B. Lobell, Marianne Bänziger, Cosmos Magorokosho, and Bindiganavile Vivek. Nonlinear heat effects on african maize as evidenced by historical yield trials. *Nature Climate Change*, 1:42–45, 2011. doi:10.1038/nclimate1043.
  - [25] Maximilian Auffhammer and Wolfram Schlenker. Empirical studies on agricultural impacts and adaptation. *Energy Economics*, 46:555–561, 2014. doi:10.1016/j.eneco.2013.09.043.
  - [26] Rahel Laudien, Bernhard Schauburger, Stephanie Gleixner, and Christoph Gornott. Assessment of weather-yield relations of starchy maize at different scales in peru to support the ndc implementation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 295:108154, 2020. doi:10.1016/j.agrformet.2020.108154.
  - [27] Cecilia Gianella, Jorge Chavez-Tafur, and Timothy S. Thomas. Climate change, agriculture, and adaptation options for peru. Technical Report 1828, International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2019.
  - [28] Stephanie A. Malin and Cecilia Gianella. "climate change might have caused our small harvest": indigenous vulnerability, livelihoods, and environmental changes in lowland and high jungle indigenous communities in peru. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 12:541–555, 2022. doi:10.1007/s13412-021-00722-0.