

# **Cadenas de Markov para la identificación de zonas de mayor riesgo de ocurrencia de sismos en Lima-Ica 2019**

Carlos Álvaro Risco Franco

## **RESUMEN**

En este estudio se aplicó el modelo de cadenas de Markov para identificar zonas de mayor riesgo de ocurrencia de sismos en el área geográfica de Lima-Ica, la cual es considerada una de las zonas sísmicas más activas del Perú. Existen pocos trabajos de investigación con aplicación de modelos probabilísticos a sismos en el Perú. En el presente estudio hemos usado la información de los sismos que han ocurrido en Lima- Ica del 2017 al 2019 (IGP) y hemos hallado que la zona de Lima-Oeste, es la que presenta mayor riesgo de ocurrencia de sismos, aproximándose este resultado, para el caso de Lima, con el resultado hallado por otros autores, con métodos diferentes.

Palabras clave: Sismos, cadenas de Markov, CTIP.

## **ABSTRACT**

In this study, the Markov Chains model was applied to identify areas with the highest risk of earthquakes in the geographic area of Lima - Ica, which is considered one of the most active seismic zones in Peru. There are few research works with the application of probabilistic models to earthquakes in Peru. In the present study we have used the information of the earthquakes that have occurred in Lima-Ica from 2017 to 2019 (IGP) and we have found that the Lima-Oeste area is the one with the highest risk of earthquakes, approaching this result , for the case of Lima, with the result found by other authors, with different methods.

Keywords: Earthquake, Markov chains, CTIP.

## INTRODUCCIÓN

Los daños materiales y pérdidas humanas que ocasionan los terremotos en el mundo, se conocen ampliamente, por tanto el problema de buscar predecir cuándo y dónde se van a producir, constituye uno de los mayores desafíos de los ingenieros sismólogos.

“El análisis de la ocurrencia de los grandes terremotos ( $M > 7.5Mw$ ) muestra que estos son recurrentes en intervalos de tiempo variables (aleatorios); sin embargo, su distribución en el tiempo y espacio ha mostrado ser una buena herramienta para empezar con la predicción de los terremotos” (Tavera y Bernal, 2005) (7).

Flores, Tavera y Rodríguez (2012) señalan que “el análisis de las secuencias de los sismos con magnitudes que oscilan entre 4.0Mw y 7.5Mw (magnitudes intermedias) ha permitido observar, en sus secuencias, determinados patrones sísmicos predecesores (PSP) que emergen y anticipan la aproximación de un gran terremoto”.

“Para la sismología los patrones sísmicos no son algo nuevo, ya que estos corresponden a muchos rasgos bien conocidos en la dinámica de la sismicidad observada, tal es el caso de las réplicas que ocurren después de un gran terremoto y permiten ver la redistribución de los esfuerzos en la corteza. También, el estudio y análisis de la sismicidad simulada mediante el uso de modelos numéricos han demostrado que los grandes terremotos son a menudo, precedidos por específicos PSP que se forman dentro de una amplia área, y emergen en la secuencia de terremotos con magnitudes menores, por ejemplo; el incremento de la actividad sísmica, el agrupamiento de eventos sísmicos, la migración y correlación de la sismicidad en el espacio y cambios en la relación de Gutenberg-Richter”. (Flores, Tavera y Rodríguez, 2012)(3).

En el presente estudio hemos aplicado el modelo de las cadenas de Markov a datos de la localización de los epicentros de los sismos, el cual se resume en el uso de las coordenadas, latitud y longitud de los mismos, delimitando primero cuatro zonas del área geográfica de Lima e Ica, cuya frecuencia de sismos durante los años 2017 al 2019, han permitido identificar a la zona de Lima Oeste, como la zona que presenta mayor riesgo de ocurrencia de sismos de nivel intermedio, dado que hemos usado los datos, no de grandes sismos, sino de sismos de magnitud intermedia disponibles.

El objetivo general del presente estudio, es contribuir a la caracterización de los sismos en el Perú e identificar sus patrones de comportamiento.

Buscar patrones de comportamiento, aplicando el modelo de las cadenas de Markov a los datos de los sismos en la zona de Lima-Ica en el periodo 2017-2019.

Identificar zonas de mayor riesgo de ocurrencia de sismos en la zona Lima-Ica.

Estamos suponiendo (hipótesis) que existen patrones de comportamiento en las zonas geográficas de Lima-Ica.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Antecedentes

En el año 2012, Christian Flores , Hernando Tavera y Leandro Rodriguez (3), aplicaron un método de predicción de terremotos a plazo intermedio, conocido como M8 (Keilis-Borok y Kossobokov, 1990) (6), al borde occidental del Perú, a fin de predecir la posible ocurrencia de sismos de gran magnitud en el futuro.

“El análisis de la ocurrencia de los grandes terremotos ( $M > 7.5Mw$ ) muestra que estos son recurrentes en intervalos de tiempo variables (aleatorios); sin embargo, su distribución en el tiempo y espacio ha mostrado ser una buena herramienta para empezar con la predicción de los terremotos. Así mismo, el análisis de los sismos con magnitudes entre  $4.0Mw$  y  $7.5Mw$  (magnitudes intermedias) ha permitido observar, en sus secuencias, determinados patrones sísmicos predecesores (PSP) que emergen y anticipan la aproximación de un gran terremoto”,(6). Así mismo señalan que “Para la sismología los patrones sísmicos no son algo nuevo, ya que estos corresponden a muchos rasgos bien conocidos en la dinámica de la sismicidad observada, tal es el caso de las réplicas que ocurren después de un gran terremoto y permiten ver la redistribución de los esfuerzos en la corteza” (6).

Entre otros hallazgos, ellos identificaron la presencia de dos CTIPs (Tiempos de Incrementos de Probabilidad en formación) correspondientes a dos áreas: para el primero, ubicado al noroeste de la ciudad de Lima, y para el segundo en el límite Perú-Chile.

En nuestro caso, nosotros aplicamos el modelo de cadenas de Markov, al área geográfica de Lima – Ica, para intentar identificar una zona con mayor riesgo de producir sismos.

### El modelo cadenas de Markov

Sea  $W$  un espacio muestral,  $P$  una medida de probabilidad sobre ella y  $A$  una sigma-algebra de conjuntos, los cuales definen el Espacio de Probabilidades ( $W, A, P$ ).

Consideremos el proceso estocástico definido en el Espacio de Probabilidades de arriba.  $X = \{X_n, n \in \mathbb{N}\}$  con espacio de estados contables .

El proceso estocástico es una cadena de markov si cumple

$$P\{X_{n+1} = j / X_0, \dots, X_n\} = P\{X_{n+1} = j / X_n\} \quad \forall j \in E \quad y \quad n \in \mathbb{N} \quad (1)$$

Si  $\{X_{n+1} = j / X_n\}$  es independiente de  $n$ , entonces la Cadena de Markov, se dice que posee, probabilidades de transición estacionarias. Se denota,

$$P_{ij} = P\{X_{n+1} = j / X_n = i\}$$

Como la probabilidad que el proceso pueda ir del estado  $i$  al estado  $j$  en un paso. Ahora introducimos la matriz  $P$

$$P = [p_{ij}]$$

Los elementos de la matriz  $P$  satisfacen las siguientes propiedades

i)  $p_{ij} \geq 0$  para todo estado  $i, j \in E$

ii)  $\sum_{j \in E} p_{ij} = 1$  para todo  $i, j \in E$

Una matriz  $P$ , que satisface esas dos propiedades, es llamada matriz de Markov o matriz de transición.

Para completar la definición de la cadena de Markov es necesario definir la distribución de probabilidades iniciales

$$p = (p_1, \dots, p_m) \text{ para todo } i \in E$$

Los elementos del vector  $p$  satisfacen las siguientes propiedades

i)  $p_i \geq 0$  para todo estado  $i \in E$

ii)  $\sum_{i \in E} p_i = 1$  para todo  $i \in E$

Para todo  $i$ ,  $p_i$  representa las probabilidades iniciales, esto es

$$p_i = P(X_0 = i), \text{ es la probabilidad que el proceso se inicie en el estado } i.$$

### Aplicación Empírica

Se han usado los datos sobre sismos en el Perú que publica regularmente el IGP, los cuales corresponden a una base de datos de los sismos desde Enero del 2017, a Diciembre del 2019, en el cual contamos para cada sismo, datos sobre la magnitud, ubicación, tiempo y profundidad.

Por otro lado, hemos usado la ubicación geográfica y hemos establecido cuatro zonas geográficas, que los consideramos en nuestro modelo como una Cadena de Markov de cuatro estados. Finalmente hemos hallado las probabilidades límites para identificar las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de sismos.

### Variables

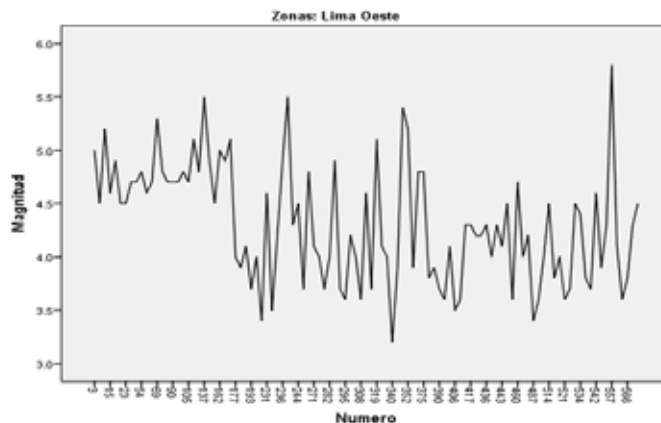
Las variables que participan en el presente estudio son las siguientes:

- Fecha del sismo, se refiere a la fecha de la ocurrencia del sismo. (día, mes, año).
- Tiempo del sismo, punto del tiempo en el cual se produce el sismo. (hora, minutos, segundos).
- Ubicación geográfica del sismo, es el lugar en el cual se produce el sismo y esta referenciado con la latitud y longitud.

- La latitud, es la distancia angular entre la línea ecuatorial (el ecuador), y un punto determinado de la Tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto. Según el hemisferio en el que se sitúe el punto, puede ser latitud norte o sur.
- La longitud, mide el ángulo a lo largo del ecuador desde cualquier punto de la Tierra. Se acepta que Greenwich en Londres es la longitud 0 en la mayoría de las sociedades modernas. Las líneas de longitud son círculos máximos que pasan por los polos y se llaman meridianos.
- Magnitud del sismo, es un número que busca caracterizar el tamaño de un sismo y la energía sísmica liberada. Se mide en una escala logarítmica, de tal forma que cada unidad de magnitud corresponde a un incremento de raíz cuadrada de 1000, o bien, de aproximadamente 32 veces la energía liberada
- La profundidad del sismo, es la profundidad aproximada medida en Km, en la cual se produce el sismo.
- Intensidad, es la intensidad del sismo en referencia a la localidad o localidades mas cercanas al epicentro del mismo.

## RESULTADOS

### La magnitud de los sismos y la profundidad– características generales



Elaboración propia

Figura 1. La magnitud de los sismos en orden de llegada de Enero 2017 a Diciembre del 2019 de la zona Lima Oeste.

En la figura 1 podemos observar que el nivel de la media disminuye ligeramente.

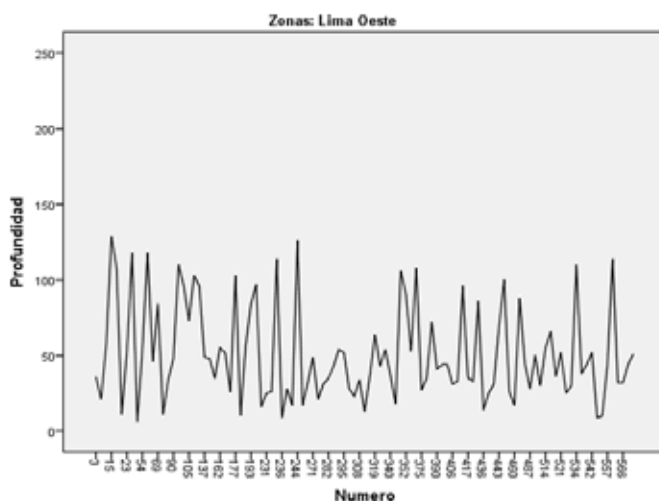


Figura 2. La profundidad (km) de los sismos en orden de llegada de Enero 2017 a Diciembre del 2019 de la zona Lima Oeste  
Elaboración propia

**Tabla 1**  
Actualizar datos de Magnitud y Profundidad  
Valores descriptivos para los sismos de la zona Lima-Ica

VARIABLES	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica	Varianza	Asimetría
Magnitud	584	4.8	3.2	8	4.496	0.6454	0.417	1.149
Profundidad	584	652	5	657	66.62	61.458	3777.043	3.03

*Elaboración propia*

Podemos observar que el nivel de la media de la magnitud de los sismos esta alrededor de 4.5 El promedio de la profundidad es 66 Km

### **Aplicación del modelo cadenas de Markov a la zona geográfica de Lima-Ica**

La ubicación geográfica de los sismos han sido clasificados en cuatro estados, permitiendo 16 posibles transiciones.

Observamos que la zona de Lima, se encuentra cercana a la zona de Ica, es por ello que el presente estudio hemos considerado conveniente incluir a ambas zonas.

Para dividir el área geográfica de Lima-Ica en cuatro zonas, se ha considerado las zonas de Lima-Oeste, Lima-Este, Ica-Oeste y Ica Este.

Los datos corresponden a la ubicación geográfica de los epicentros de los sismos de Lima-Ica de Enero 2017 a Diciembre del 2019.

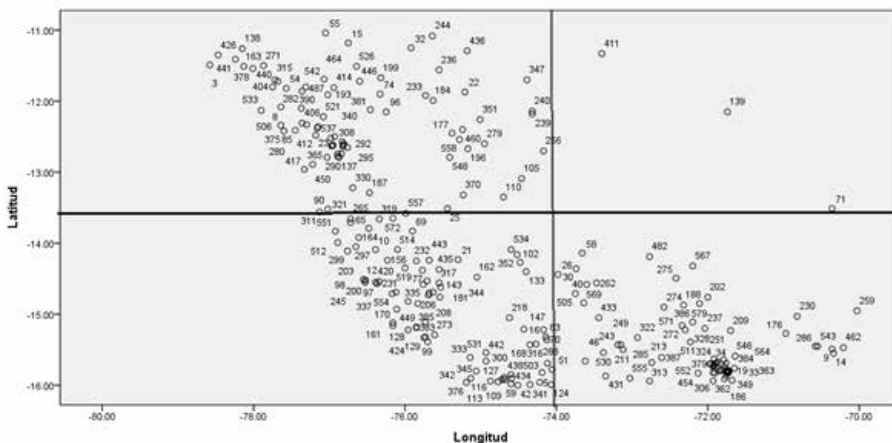


Figura 4. El área geográfica de Lima - Ica dividida en 4 zonas  
 Elaboración propia

Para lo cual se ha trazado una línea diagonal que va desde el punto (Latitud -15, -82) a ( Latitud -15, Longitud-68) y la línea vertical ( Latitud -15.8, Longitud -74.0) a ( Latitud -10.8, Longitud -74.0).

Se ha hallado la matriz de transición, para el cual, primero hemos hallado la matriz de frecuencias de los sismos para cada zona geográfica.

**Tabla 10**  
 La matriz de frecuencias de sismos en las zonas geográficas Lima-Ica

Estados	Ica Oeste	Lima Oeste	Ica Este	Lima Este	Total	Prop
Ica Oeste	21	23	13	0	57	0.24
Lima Oeste	22	51	26	6	105	0.44
Ica Este	12	27	28	1	68	0.29
Lima Este	2	3	2	1	8	0.03
Total	57	104	69	8	238	1

Elaboración propia

Luego se ha calculado la matriz de transición de las zonas geográficas con la siguiente fórmula.

$$\hat{P}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^m a_{ik}}$$

Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 11**

La matriz de probabilidades de transición para las zonas geográficas Lima-Ica

	Ica Oeste	Lima Oeste	Ica Este	Lima Este
Ica Oeste	0.368	0.404	0.228	0.000
Lima Oeste	0.21	0.486	0.248	0.057
Ica Este	0.176	0.397	0.412	0.015
Lima Este	0.25	0.375	0.250	0.125

*Elaboración propia*

Luego de 5 pasos, el comportamiento de la matriz de transición llega a una cierta “estabilidad” expresada en la siguiente matriz.

**Tabla 12**

Matriz con probabilidades límites para las zonas de Lima-Ica

	Ica Oeste	Lima Oeste	Ica Este	Lima Este
Ica Oeste	0.2396	0.4374	0.2913	0.0334
Lima Oeste	0.2398	0.4378	0.2916	0.0335
Ica Este	0.2394	0.4373	0.2915	0.0335
Lima Este	0.2396	0.4373	0.2913	0.0335

*Elaboración propia*

Es así, hemos hallado las probabilidades límites para cada zona, esto es para la zona Ica Oeste es 0.2396, para la zona Lima Oeste es 0.4374, para la zona Ica Este es 0.2913 y para la zona Lima Este es 0.0335.

Además esto se puede interpretar como los riesgos de ocurrencia de sismos en dichas zonas geográficas. Y como se podrá observar es la zona Lima-Oeste, con 0.43, es la que presenta mayor probabilidad de ocurrencia de un sismo de mediana magnitud. Le sigue la zona Ica Este con 0.29 de probabilidad.

Si consideramos que la matriz de transición recoge la información de los sismos de 3 años, y para llegar a un estado “estable” ha requerido 5 pasos, lo cual correspondería a 15 años, tiempo en el cual en la zona de Lima-Oeste, podría presentarse un sismo de gran magnitud (0.43), seguido de la zona de Ica-Este (0.29), seguido de la zona Ica Oeste (0.23). Es poco probable que ocurra un sismo en la zona Lima Este (0.03).



## CONCLUSIONES

1. Con la aplicación del modelo de cadenas de Markov, a las zonas de Lima-Ica, se ha identificado a la zona de Lima-Oeste, como la que presenta el mayor riesgo de ocurrencia de sismos, con 0.4374 de probabilidad. Le sigue la zona de Ica-Este con un riesgo de 0.2913 de probabilidad.
2. El resultado hallado en el cual Lima -Oeste es la zona que presenta mayor riesgo de ocurrencia de sismos, se aproxima en parte, con el resultado hallado por Flores – Tavera y Rodríguez en el 2012 (1), de un CTIP en la zona noroeste de Lima.

## RECOMENDACIONES

1. Dado que en esta oportunidad se ha utilizado los datos correspondientes a enero 2017 a Diciembre del 2019, lo cual es un limitación de este estudio preliminar, se recomienda ampliar el estudio a un número mayor de años y con sismos de mayor magnitud.
2. Es posible aplicar la metodología del modelo de cadenas de Markov a otras zonas geográficas del Perú.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alejandro Tejedor, Javier B. Gomez, Amalio F. Pacheco, “One-Way Markov Process Approach to Repeat Times of Large Earthquakes in Faults”, Springer Science-Business Media New York 2012.
- Alvarez, Estimation in stationary Markov renewal processes, with application to earthquake forecasting in Turkey, *Methodol. Comput. Appl. Probab.* (2005).
- Christian Flores<sup>1</sup>, Hernando Tavera<sup>2</sup> y Leandro Rodriguez<sup>3</sup>, Aplicación del Algoritmo M8 en el borde Occidental del Perú: Incrementos de probabilidad para la ocurrencia de grandes terremotos. Sociedad Geológica del Perú, 2012.
- Garavaglia and R. Pavani, About earthquake forecasting by Markov renewal processes, *Methodol. Comput. Appl. Probab.* (2009).
- Giovanni Masala, Earthquakes occurrences estimation through a parametric semi-Markov approach, 2016.
- Keilis-Borok V. y Kossobokov V. (1990). “Localization of intermediate-Term earthquake prediction”. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No B12, November 10, 1990.

5. K. Orfanogiannaki, D. Karlis, and G.A. Papadopoulos, Identifying seismicity levels via Poisson hidden Markov models, *Pure Appl. Geophys.* (2010),
- Tavera y Bernal, “Distribución espacial de área de ruptura y lagunas sísmicas en el Borde Occidental de Perú”, IGP 2005.