



Representación difusa del umbral de precipitaciones en el desencadenamiento de procesos de remoción en masa

Fuzzy representation of rainfall threshold in triggering mass removal processes

Representação difusa do limiar de precipitações no desencadeamento de processos de remoção em massa

José González-Campos¹ • Carlos Romero-González² • Cristian Carvajal-Muquillaza¹

Received: *Jan/22/2020* • Accepted: *May/28/2020* • Published: *Jan/31/2021*

Resumen

El objetivo principal de esta investigación es la implementación de una nueva metodología de representación cuantitativa de registros métricos sobre los procesos de remoción en masa que incorpore la imprecisión propia y en coherencia con la naturaleza humana o técnica. La pesquisa se enmarca en un paradigma positivista, con alcance cuantitativo, de medición longitudinal, en un contexto propositivo. La muestra de estudio está caracterizada por los registros diarios de precipitaciones de las estaciones meteorológicas Punta Ángeles del Servicio Meteorológico de la Armada de Chile y Laboratorio de Meteorología del Instituto de Geografía, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, entre los años 2008 y 2013. Como resultado, se observa que la metodología propuesta permite tomar decisiones rápidas y con un soporte estadístico formal, además se muestra consistencia en las mediciones de precipitaciones realizadas por ambas estaciones; por otro lado, se mejoró la creación de un umbral de alerta y finalmente, se pudo establecer que la variabilidad de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas de estudio y los años de registro no presentan diferencias significativas, por lo que se concluye que la propuesta se transforma en una mejora cualitativa en la generación de resultados cuantitativos.

Palabras clave: Umbral; remociones en masa; conjuntos difusos; precisión; inferencia estadística.

Abstract

The main objective of this research is to implement a new methodology for the quantitative representation of metric records on mass removal processes that incorporates the characteristic imprecision consistent with human and/or technical nature. The research used a positivist paradigm with a quantitative scope and longitudinal measurement in a propositive context. The study sample included daily rainfall records of the Punta Ángeles meteorological stations from the Chilean Navy Meteorological Service and Meteorological Laboratory of the Institute of Geography of the Pontifical Catholic University of Valparaiso, between 2008

José González-Campos, ✉ jgonzalez@upla.cl, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0003-4610-6874>

Carlos Romero-González, ✉ cromero@upla.cl, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0002-3940-5991>

Cristian Carvajal-Muquillaza, ✉ cristian.carvajal@upla.cl, Orcid ID: <https://orcid.org/0000-0001-5561-2416>

1 Departamento de Matemática y Estadística, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile

2 Departamento de Ciencias Geográficas, Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile



and 2013. As a result, it is observed that the proposed methodology allows for quick decision-making with formal statistical support, as well as consistency in the precipitation measurements from both stations. In addition, the creation of an alert threshold was improved, and no significant differences were established in the rainfall variability in the meteorological stations studied and the recording years, which leads to the conclusion that this proposal represents a qualitative improvement in generating quantitative results.

Keywords: Fuzzy sets; Mass removals; Precision; Statistical inference; Threshold

Resumo

O principal objetivo desta pesquisa é a implementação de uma nova metodologia de representação quantitativa de registros métricos sobre os processos de remoção em massa que integre a imprecisão própria e congruente com a natureza humana ou técnica. A pesquisa se enquadra em um paradigma positivista, com alcance quantitativo, de medição longitudinal, em um contexto propositivo. A amostra de estudo está caracterizada pelos registros diários de precipitações das estações meteorológicas *Punta Ángeles* do Serviço Meteorológico da Armada do Chile e Laboratório de Meteorologia do Instituto de Geografia, da Pontifícia Universidade Católica de Valparaíso, entre os anos 2008 e 2013. Como resultado, observa-se que a metodologia proposta permite tomar decisões rápidas e com um apoio estatístico formal, além de mostrar consistência nas medições de precipitações realizadas por ambas as estações; por outro lado, a criação de um limiar de alerta melhorou e, finalmente, foi possível estabelecer que a variabilidade das precipitações nas estações meteorológicas de estudo e os anos de registro não apresentam diferenças significativas, razão pela qual a proposta se transforma em uma melhora qualitativa na geração de resultados quantitativos.

Palavras-chave: Limiar; remoções em massa; conjuntos difusos; precisão; inferência estatística

INTRODUCCIÓN

Los procesos de remoción en masa (RM) son una de las amenazas naturales más destructivas que se conocen a nivel mundial (Hauser, 2000). Estos procesos corresponden a una variedad de tipologías que, debido a la interacción de factores geográficos, geológicos, tectónicos y climáticos, de carácter local y regional, generan movimientos gravitacionales de suelo y roca de diferente magnitud y velocidad (Hauser, 2000). En Chile, los eventos de RM son comunes, dadas las características de la configuración del relieve, y causantes de graves daños en vidas humanas, infraestructura y bienes materiales.

La investigación mundial sobre los factores involucrados en el desarrollo de remociones en masa se ha incrementado

notablemente en la última década, debido al impacto provocado en las sociedades asentadas en laderas inestables o que, producto de una expansión urbana mal planificada, ocupan áreas expuestas a estos eventos (Foti, 2012). Dado que son fenómenos complejos, su estudio requiere un enfoque interdisciplinario con el fin de diferenciar las condiciones de desarrollo y mecanismos desencadenantes en ambientes morfoclimáticos distintos.

En función de la trascendencia de la temática, el proceso de medición que subyace a estos eventos a la hora de comprender su dinámica o anticiparse al desencadenamiento de éstos es relevante, y requiere de decisiones rápidas y acertadas por parte de la autoridad, pues se involucra a la población civil y la infraestructura local, las pérdidas



humanas y materiales, las cuales, finalmente, se traducen en inversiones o dinámicas económicas de alta potencia. Por ello, debe tratarse con mucho cuidado y en coherencia con las limitaciones técnicas y humanas de un proceso de medición. Desde la perspectiva probabilística, la probabilidad de que un registro de precipitación en una estación puntual coincida como el nivel medio de precipitación del sector que representa es 0, por tanto y considerando esta dinámica de eventos en probabilidad, un registro o medición debe reconocer como suyo un error de medición o imprecisión en su registro.

Por tal razón, en este artículo se presenta una metodología de cuantificación que pretende caminar hacia representaciones coherentes con el efecto de la naturaleza humana o limitaciones de cuantificación por tecnología en el proceso métrico, utilizando las estructuras numéricas difusas como mecanismo de aproximación a un nuevo sistema métrico. En este sentido, el presente trabajo se propone como objetivo general implementar una nueva metodología de representación cuantitativa de registros métricos que incorpore la imprecisión propia y en coherencia con la naturaleza humana o técnica. Como objetivos específicos: (1) Representar de manera difusa los registros medios de precipitaciones anuales; (2) Diseñar un método de comparación de precipitaciones y estaciones meteorológicas utilizando las representaciones difusas; (3) Analizar un conjunto de datos reales usando la metodología propuesta; (4) Promover la toma de decisiones métricas e inferenciales con base en las representaciones difusas; (5) Establecer la consistencia de las mediciones de precipitaciones realizadas por ambas estaciones de estudio, usando la metodología propuesta.

MARCO TEÓRICO

Cuando se trata de resumir un registro frecuencial de precipitaciones, ya sea a través de la media, varianza o ajustando un modelo explicativo, estamos en un contexto estadístico y, por tanto, regido por los métodos estadísticos, para los cuales el objetivo principal es la reducción de los datos (Fisher, 1922). Generalmente, se supone que las cantidades de interés de la población objetivo pueden ser modeladas usando medidas de probabilidad, especificadas relativamente por pocas cantidades desconocidas llamadas parámetros. Por otra parte, Fisher (1922) señala que los datos observados representan toda la información relevante sobre los parámetros desconocidos. En este contexto, uno de los principales retos en la modelación estadística es hacer inferencias sobre estos parámetros utilizando la información proporcionada por los *datos observados*. Luego, la afirmación de Fisher se puede resumir como la búsqueda de la probabilidad muestral P^θ que modele adecuadamente los datos observados o, en otras palabras, buscar un posible valor para θ (Estimación puntual) o un subconjunto de Θ (Estimación por conjuntos de confianza), donde se contengan medidas de probabilidad que se adecuen, de forma correcta, a los datos observados. Esto quiere decir que, a partir de la muestra, se proponen valores o modelos que expliquen el comportamiento de los datos (González, Castro, Lachos y Patriota, 2016).

Si se repite el experimento y se calcula un conjunto de confianza para cada experimento, se espera que el parámetro del modelo de probabilidad que corresponda a los datos observados esté contenido en un porcentaje de esos conjuntos de confianza, determinado por el nivel de confianza. Sin



embargo, en la práctica, el experimento se repite una vez y sólo se observa un conjunto de confianza, es más, en situaciones relativas a las precipitaciones es aún más restrictiva esta situación, pues, si no se realizó el registro de un nivel de precipitación, este definitivamente ya no se hizo. Este conjunto de confianza establecido contiene valores no aleatorios, de ahí que la probabilidad de que este conjunto de confianza observado contenga algún punto específico o región será siempre cero o uno (Neyman, 1956).

Por lo tanto, después de observar la muestra, la interpretación de los conjuntos de confianza no se puede hacer en términos de frecuencias (para más detalles, ver Hoff, 2009, p. 41). En este contexto, nuestro trabajo intenta considerar estas características del proceso de medición en el estudio de precipitaciones por estaciones de monitoreo y cómo deberían ser interpretados estos registros, formalizar y restringir las interpretaciones automáticas y reconocer las imprecisiones del proceso, la incapacidad de medir con precisión o representatividad de una estación de monitoreo.

Reconocer la limitación no significa dejar de realizar los procedimientos de análisis o reducción de la información, sino, más bien, establecer nuevos procesos que permitan incorporar en las interpretaciones estas características y limitantes métricas existentes. En este contexto y reconociendo la problemática planteada, es que la metodología de trabajo para dar respuesta al desafío es la utilización de estructuras numéricas difusas, las cuales son descritas en las secciones siguientes.

De manera inicial es importante evidenciar la teoría que vincula la aleatoriedad y los conjuntos difusos. El desarrollo de la teoría de conjuntos difusos generado por Zadeh (1965 y 1999) permite generar

distribuciones de posibilidades mediante el uso de conjuntos de confianza, existiendo variados ejemplos desarrollados por Dubois, Kerre, Mesiar, Prade (2000) y Mauris (2009), en donde se evidencia una relación de implicancia o dominancia de las medidas de posibilidad en relación con las de probabilidad, en el siguiente sentido: los eventos con posibilidad cero deben tener probabilidad cero, sin embargo, no todos los eventos con posibilidad positiva tienen probabilidad positiva (Dubois y Prade, 1982). Es decir, en algunos casos, algunos eventos con posibilidad positiva tienen probabilidad cero. Por lo tanto, las medidas de posibilidad pueden proporcionar una información que no es posible apreciar en las medidas de probabilidad. En los desarrollos de González *et al.* (2016) se muestra que, para una muestra observada dada, la distribución de posibilidad relacionada provee información sobre la estructura de los conjuntos de confianza.

La teoría de conjuntos difusos proporciona un tratamiento matemático de algunos términos lingüísticos vagos como “aproximado”, “alrededor”, “cerca”, “corto”, entre otros. Desde el punto de vista de la teoría difusa, los números son idealizaciones de información imprecisa expresada por medio de valores numéricos. Por ejemplo, cuando registramos el ancho de un río o la pendiente de un terreno, se registra un valor numérico que incluye algunas imprecisiones (González *et al.*, 2016). Tales inexactitudes pueden haber sido causadas por los instrumentos de medición, limitaciones humanas, redondeo o información previa sesgada entre muchas otras causas. Si el valor “real” del ancho del río o la pendiente del terreno está representado por el número h , tal vez sería más correcto decir que el valor del ancho o pendiente es aproximada y no exactamente



h (De Barros y Bassanezi, 2006); la palabra “aproximadamente” es imprecisa y la teoría de conjuntos difusos puede proporcionar un valor adicional a los métodos estadísticos, debido a la incertidumbre inherente al mundo observable y sus fuentes de información asociadas, se combinan más allá de la teoría de la probabilidad tradicional. No podemos presuponer y asumir que un registro puntual en un amplio espacio representa con precisión una métrica de precipitaciones.

Para mayor conocimiento relativo a la teoría de conjuntos difusos se sugiere leer Zadeh (1965), Dubois y Prade (1978) y Naseri, Taleshian, Alizadeh y Vahidi (2012).

Una de las definiciones más importantes en la teoría de conjuntos difusos, y dada la pertinencia para la propuesta, es el concepto de función de pertenencia, que viene a modelar los grados de credibilidad asociados a cada posible valor del parámetro que resume el proceso.

Definición: Sea $\Omega \subseteq \mathbb{R}^k$ un conjunto no vacío del espacio euclidiano

k-dimensional. Un conjunto difuso \tilde{A} , es un conjunto de pares ordenados $\tilde{A} = \{(w, \mu_{\tilde{A}}(w)); w \in \Omega\}$, donde $\mu_{\tilde{A}}: \Omega \rightarrow [0,1]$ es denominada función de pertenencia del conjunto difuso \tilde{A} . Además, el conjunto vacío es caracterizado por un valor en la función de pertenencia igual a 0.

La teoría de conjuntos difusos extiende la teoría de conjuntos tradicionales, relajando el concepto de pertenencia de sus elementos a los respectivos conjuntos. Otra definición importante para la propuesta es el concepto siguiente:

Definición: Core de un conjunto difuso \tilde{A} es definido como $Cor(\tilde{A}) = \{w \in \Omega; \mu_{\tilde{A}}(w) = 1\}$.

METODOLOGÍA

Preguntas, hipótesis y objetivos de investigación

Considerando todo lo anterior, la investigación incorpora la siguiente relación entre preguntas e hipótesis de trabajo:

Tabla 1. Preguntas e hipótesis de investigación

Preguntas	Hipótesis de trabajo (o investigación)
¿Cómo incorporar la imprecisión en los procesos métricos de análisis de los registros de precipitaciones?	<ul style="list-style-type: none"> La representación difusa de las mediciones permite resumir un proceso descriptivo e inferencial.
¿Qué ventajas incorpora el uso de la teoría de conjuntos difusos en el registro y análisis de precipitaciones?	<ul style="list-style-type: none"> La representación difusa de un proceso de registro de precipitaciones permite tomar decisiones rápidas y con soporte estadístico formal.
¿La representación difusa de los registros de las precipitaciones de las estaciones meteorológicas de estudio presenta equivalencia estadística?	<ul style="list-style-type: none"> Los registros de precipitaciones de las estaciones meteorológicas de estudio son estadísticamente iguales.
¿La representación difusa de los registros de precipitaciones en las dos estaciones meteorológicas de estudio da evidencia de cambios significativos en el nivel de precipitaciones entre los años 2008 y 2013?	<ul style="list-style-type: none"> La variabilidad de las precipitaciones en las estaciones meteorológicas de estudio y los años de registro no presentan cambios significativos.

Nota: Elaboración propia, con base a propuesta de Hernández, Fernández y Baptista (2014).



Tipo de investigación

La investigación se enmarca en un paradigma positivista, con alcance cuantitativo, de medición longitudinal, en un contexto propositivo (Hernández, Fernández y Baptista, 2014).

Unidad de análisis, universo y localización de la muestra

El universo de estudio es caracterizado por los registros diarios de precipitaciones de dos estaciones meteorológicas que están en la región de Valparaíso, Estación Punta Ángeles perteneciente al Servicio Meteorológico de la Armada de Chile (PAAC) y la Estación del Laboratorio de Meteorología del Instituto de Geografía, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (IGPU-CV), entre los años 2008 y 2013.

Las unidades de estudio son realizaciones de procesos probabilísticos y, por lo tanto hay presencia de aleatoriedad. El tamaño de la muestra sujeta a datos perdidos no se ve afectada por el nivel de confianza del 95 %, y error de estimación del ± 5 %, según la fórmula de Namakforoosh (2000), pues es prácticamente un censo para la cohorte 2008-2013.

Recolección de datos

Los datos utilizados para la propuesta y el análisis son obtenidos desde las estaciones meteorológicas de estudio: Estación Punta Ángeles (PAAC) y la Estación del Laboratorio de Meteorología del Instituto de Geografía (IGPUCV), no existen conflictos de interés.

Criterios de rigor

La manipulación de los datos, en el proceso de transformación a información, se realiza utilizando el software r-project 3.3.3., de carácter libre.

Limitaciones del estudio

Una limitación básica que puede definirse como conceptual es que los umbrales de precipitación inevitablemente representan una simplificación de la relación entre lluvia y las RM (Reichenbach *et al.*, 1998), por lo tanto, en este trabajo no se han incorporado al análisis de los procesos, el conjunto de factores condicionantes presentes en la geografía de la ciudad de Valparaíso. Otra limitación es el tipo y calidad de los datos (Aleotti, 2004), ya que la localización espacial, al parecer, no es criterio para la instalación de estaciones meteorológicas o simplemente pluviómetros que puedan registrar, con confiabilidad, datos que permitan generar modelos que sirvan para implementar mecanismos de alerta temprana, para la protección civil y de la infraestructura local.

La ocurrencia de eventos de RM importantes a escala regional es un hecho demasiado raro, para generar una caracterización estadística para este factor desencadenante (Biasutti, Seager y Kirschbaum, 2016), por lo tanto, se evidencia un abuso de umbrales empíricos, los cuales sólo relacionan intensidad, frecuencia y duración de las precipitaciones, con el desencadenamiento de procesos y la falta de umbrales físicos que integren enfoques hidrológicos, geotécnicos y geomorfológicos (Aleotti, 2004). Esta es una gran limitación de los estudios que se han hecho en Chile. Tampoco hay investigaciones que relacionen las remociones y sus umbrales de desencadenamiento con ingreso a la ecuación, la inestabilidad generada por los movimientos sísmicos en el área. Estudios realizados en China (Ma, Yujie, Kaiheng y Yang, 2017) indican un impacto significativo en la reducción del umbral de intensidad y duración de las precipitaciones, en el desencadenamiento de estos procesos en zonas afectadas por terremotos recientes.



Método

Para lograr la conexión entre los registros de precipitaciones y las representaciones difusas, es importante indicar que es necesario asumir o identificar algún modelo distribucional que se cree gobierna el comportamiento de los registros de datos de precipitaciones. Para el caso de la propuesta y basado en la convergencia asintótica de los modelos distribucionales, se utilizará el supuesto de normalidad.

En este contexto, la función de pertenencia queda identificada por:

$$\mu_{\bar{A}}(w) = 2 \left(1 - \phi \left(\frac{|\bar{x} - w|}{\sigma} \right) \right)$$

Donde \bar{x} representa la media muestral de las precipitaciones registradas o sobre las cuales se desee definir el estudio, σ representa la desviación estándar poblacional. Se indica que de no disponer de σ , puede ser utilizada la distribución t-student y la estimación muestral de la desviación estándar.

Se debe indicar que no es la única función de pertenencia. En trabajos futuro se presentará una función de pertenencia en coherencia con el modelo distribucional propio de los datos, lo que puede originar asimetrías y otro tipo de informaciones (se recomienda leer [González et al, 2016](#)).

Se observa que el disponer de una función de pertenencia

que dependa de la media y la varianza enriquece el análisis e interpretación, pues, en definitiva, una función de pertenencia está resumiendo una secuencia infinita de regiones o intervalos de confianza para los diferentes niveles de significancia. Es decir, además puede ser utilizada como criterio de decisión relativo a cambios o diferencias significativas entre precipitaciones anuales. Esto es, incorporar esta metodología de visualización y análisis permite disponer de información descriptiva e inferencial, conjuntamente, en una única estructura numérica, el número difuso.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para formalizar esta propuesta de análisis de los registros métricos, usaremos las bases de datos de dos estaciones meteorológicas de la región de Valparaíso (PAAC) y (IGPUCV). Los datos son resumidos en la Figura 1.

Se insiste que generalmente los datos que se registran se utilizan para describir fenómenos de índole geográfico, meteorológicos o climáticos; sin embargo, en este caso,

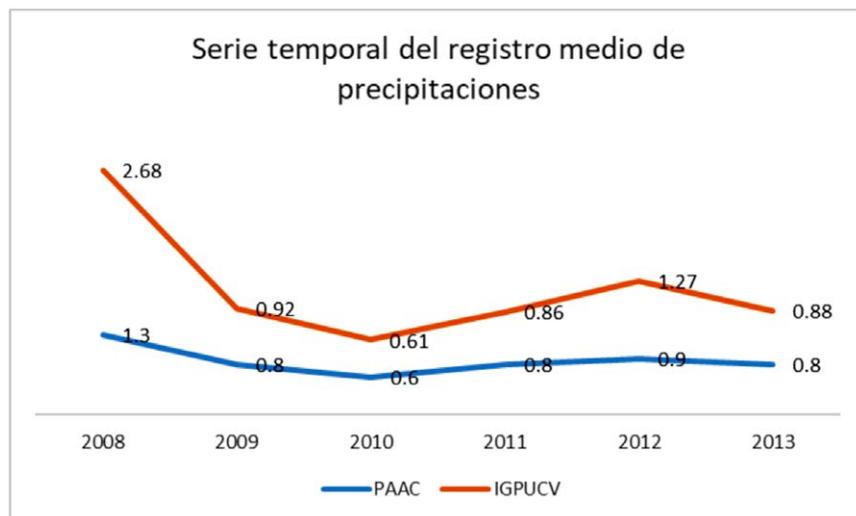


Figura 1. Resumen temporal de precipitaciones en las estaciones PAAC e IGPUCV

Nota: Fuente propia de la investigación.



los desafíos métricos se relacionan con los registros de estas estaciones, ya sea para decidir respecto de la representatividad o de la consistencia de las mediciones realizadas por las estaciones. Esto implica decidir, si podemos asumir que ambas estaciones caracterizan la misma población; determinar, si las variaciones en las medias anuales de precipitación registradas por las estaciones alcanzan la significatividad o son, simplemente, consecuencia de la aleatoriedad y no una causa, y, finalmente, resumir la varianza de las precipitaciones anuales de manera que permita realizar estimaciones respecto de la homogeneidad de cada año.

La primera aplicación se relaciona con la descripción de las mediciones de la Estación del Laboratorio de Meteorología del Instituto de Geografía, de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (IGPUCV), particularmente los registros de las precipitaciones medias anuales entre los años 2008 a 2013, por tanto, son registros reales.

En la Figura 2 se muestran los datos obtenidos de la utilización de la función de pertenencia descrita en la sección método.

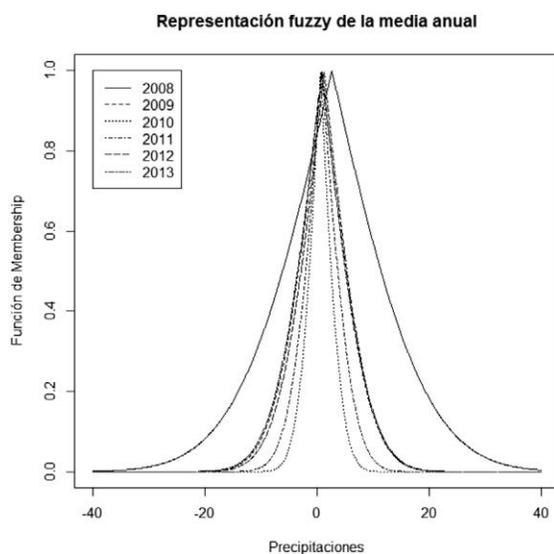


Figura 2. *Representación difusa de la media anual de precipitaciones*
Nota: Fuente propia de la investigación.

La representación difusa de la media anual de precipitaciones permite tener un resumen inmediato de toda su dinámica, por ejemplo, que el año 2008, línea continua, presenta mayor variabilidad y mayor valor medio observado. Se observa que hay similitud en la variabilidad de las precipitaciones entre el año 2009 y 2013.

El lector se preguntará respecto del conjunto de valores negativos en las precipitaciones; sin embargo, es simplemente una representación para observar en plenitud toda la función de pertenencia. En la Figura 3, la función de pertenencia será truncada en 0, esto significa que solo se visualizarán las precipitaciones reales posibles de observar.

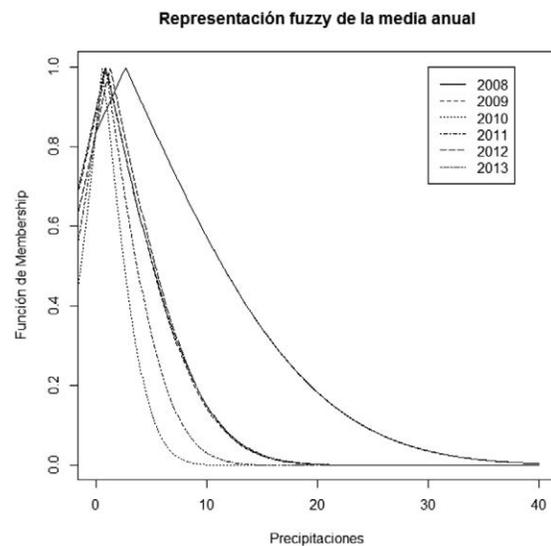


Figura 3. *Representación difusa de la media anual de precipitaciones con soporte real*

Nota: Fuente propia de la investigación.

Otro aspecto importante que se observa por medio de esta representación es el diferencial en los puntos máximos, evidenciándose una mayor precipitación para el año 2008. La Figura 4 amplifica estas relaciones y, por tanto, es posible indicar



que el año de menor precipitación corresponde al año 2010, además de disponer la menor variabilidad.

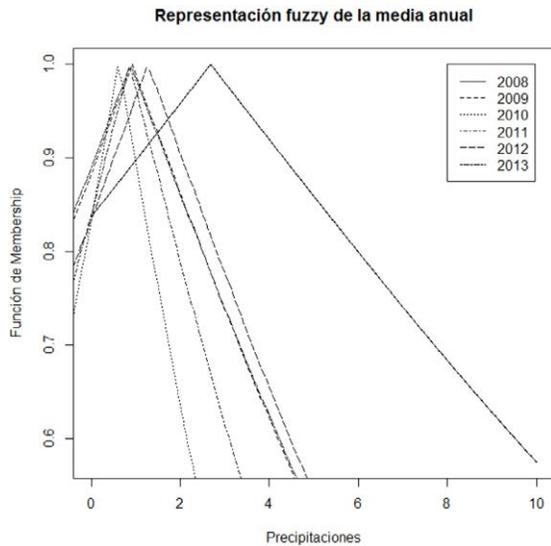


Figura 4. Representación difusa de la media anual de precipitaciones, puntos máximos

Nota: Fuente propia de la investigación.

Las diferencias observadas en la Figura 4 traen consigo una interrogante inferencial, ¿la diferencia entre los valores de máximo para la función de pertenencia, caracteriza diferencias significativas? El disponer de estas representaciones nos permite dar respuesta directa a esta inquietud. En estudios inferenciales, poder responder cuando un cambio es por aleatoriedad o cuando se debe a una causa es fundamental. Para poder decidir al respecto, con base en estas estructuras, basta con trazar una línea horizontal de altura 0.05, que representa el nivel de significancia máximo de tolerar para su prueba. Se obtuvo el gráfico de la Figura 5.

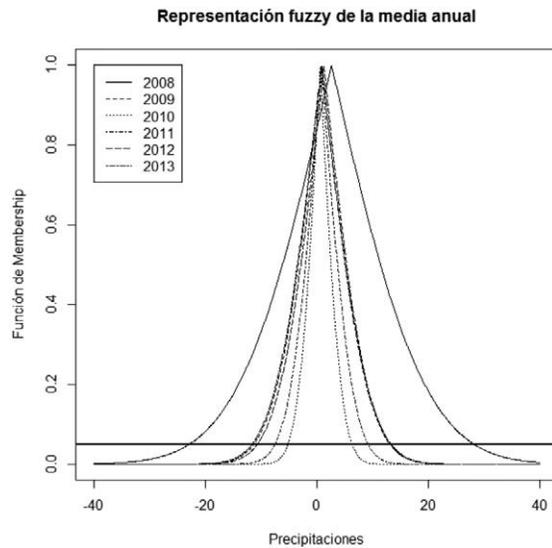


Figura 5. Representación difusa de la media anual de precipitaciones, Test inferencial

Nota: Fuente propia de la investigación.

Para poder realizar inferencia y poder decidir si existen cambios significativos en las precipitaciones anuales, basta con establecer si las funciones de pertenencias sobre la recta horizontal presentan regiones de intersección. Si se observa, no es difícil establecer que las intersecciones de las funciones de pertenencias se mantienen sobre la recta, por tanto, la diferencia en las medias de las precipitaciones no se debe a una causa, sino son cambios producto de la aleatoriedad de lo que se mide. Para entender o tener presente de cuál debería ser la representación gráfica en donde sí se puede afirmar la existencia de diferencias significativas, se simulará el gráfico que aparece en la Figura 6.

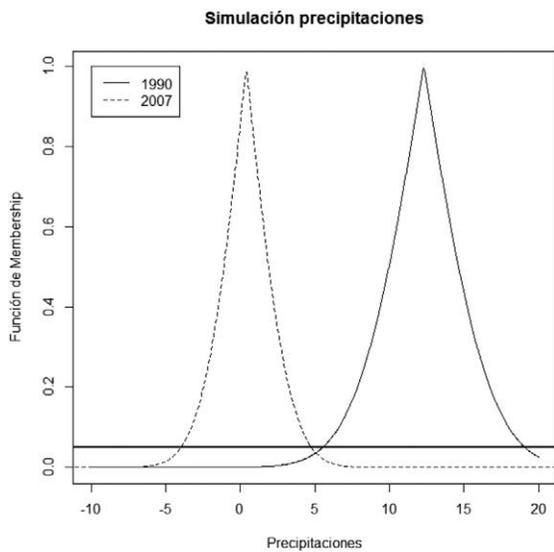


Figura 6. Simulación de precipitaciones (datos no reales, solo para ejemplificar).
Test inferencial

Nota: Fuente propia de la investigación.

En la Figura 6, se observa que las intersecciones de las funciones de pertenencias están bajo la recta horizontal de altura 0.05, esto es, existen diferencias significativas entre las medias anuales de precipitación a un nivel de confianza del 95 % y, por tanto, la variabilidad de la media se debe a una causa y no es producto de la aleatoriedad.

En la sección siguiente se presentará un análisis de las precipitaciones en función de un conjunto de datos reales.

Como se indicó en las secciones previas, se contrastarán las dos estaciones meteorológicas, identificadas con los acrónimos PAAC y IGPUCV, entre los años 2008 y 2013. La especificación de

estos años se debe a que el origen de registro de IGPUCV es a partir del 2008.

Al aplicar la metodología de representación y análisis para los registros de precipitaciones de ambas estaciones se obtuvieron los gráficos que se presentan en la Figura 7.

La primera observación que se realiza, al existir sobreposición de las funciones de pertenencias de cada año de registro de las precipitaciones anuales, es la no existencia de diferencias significativas en cuanto a las precipitaciones. Se debe indicar que se visualiza una disminución en la media anual; sin embargo, no caracteriza una diferencia estadísticamente significativa. Esta situación es observada en ambas estaciones, lo cual abre algunas inquietudes de investigación futura como verificar, si el cambio climático ha disminuido, significativamente, las precipitaciones.

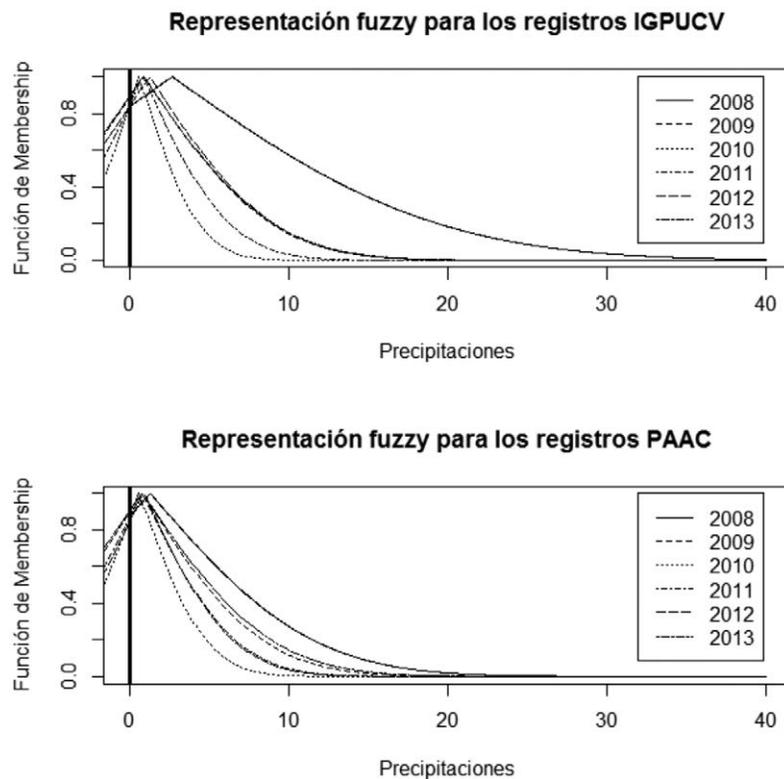


Figura 7. Representación difusa de los registros de ambas estaciones, entre 2008 y 2013

Nota: Fuente propia de la investigación.



Por otro lado, el interés de esta sección es determinar, si las estaciones meteorológicas pueden ser consideradas estadísticamente iguales. Las implicancias de esta inquietud tienen relación con la consistencia del registro y la libertad de generalización de los resultados de análisis a ambas estaciones. La Figura 8 presenta una comparación difusa entre los registros de ambas estaciones.

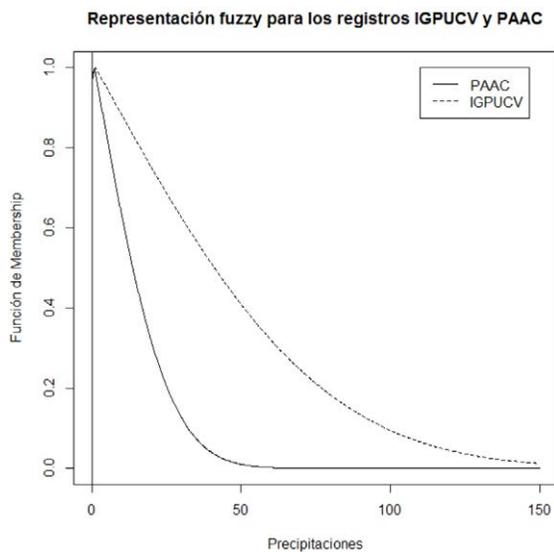


Figura 8. Comparación difusa entre los registros de las estaciones IGPUCV y PAAC
Nota: Fuente propia de la investigación.

Se observa que no existen diferencias significativas en los registros, es decir, se pueden asumir como una única estación y, por lo tanto, las conclusiones basadas en una pueden ser proyectadas sobre la otra. Sin embargo, es importante notar la superioridad o supremacía (González *et al.*, 2016) de la curva punteada relativa a IGPUCV, lo que evidencia alta variabilidad. Ello despierta la inquietud de diferencias significativas en las varianzas debido a sub o sobre estimaciones de los registros.

Con el apoyo de los análisis anteriores, para la definición difusa del umbral de precipitaciones que generan procesos de remoción en masa, se debe considerar

la variabilidad de los datos, con base en el fuerte impacto que tiene sobre IGPUCV de la Figura 7. Es decir, no se puede establecer un umbral sin referirse a la variabilidad de los registros. Para la representación difusa del umbral, consideraremos tres propuestas existentes en relación con establecer un umbral de manera convencional. La primera, de Erikson y Hogstedt (2004), identifica, de manera frecuencial, las posibilidades de ocurrencia de procesos de remoción en masa; similarmente lo hace SERNAGEOMIN y, finalmente, Martínez (1994), quien indica un valor específico. Para ello será considerada la variabilidad media de los registros anuales desde 2008 hasta 2013 de ambas estaciones, procurando representatividad y consistencia. Se debe indicar que la propuesta de Erikson y Hogstedt (2004) y SERNAGEOMIN es una representación difusa, solo que a nivel inicial y discreto. Todas las mediciones se hacen en intensidad de precipitaciones en 24 horas.

Esta comparación y modelación es presentada en la Figura 9.

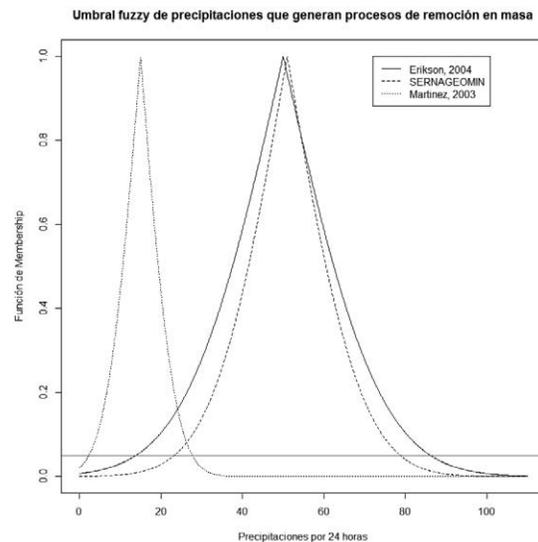


Figura 9. Representación difusa del umbral de precipitaciones que generan procesos de remoción en masa
Nota: Fuente propia de la investigación.



Se observa que existe mucha similitud en el umbral definido por Erikson y Hogstedt (2004) y SERNAGEOMIN, pues el de Erikson y Hogstedt (2004) es usado como referencia; sin embargo, realiza afirmaciones con otros niveles de credibilidad, descritos en la Tabla 2.

Esas afirmaciones son situaciones particulares del modelo difuso presente en la Figura 9, en donde la expresión “frecuentemente” usada por Erikson y Hogstedt (2004), por ejemplo, en esta modelación es cuantificada por un valor en la función de pertenencia de aproximadamente 0.4; en cambio, para SERNAGEOMIN “Pueden ocurrir algunas”, cuantificada con un valor en la función de pertenencia de aproximadamente 0.2.

Se observa que el recorrido de la función de pertenencia nos permite proponer señales de alerta, pues como estos modelos son soportados sobre procesos inferenciales, podemos asignar niveles de confianza a cada una de las cotas o intensidades de precipitación.

La señal de alerta es visualizada en la intersección de la recta horizontal continua y la función de pertenencia continua, proceso que incluye a Martínez (1994).

CONCLUSIONES

A la fecha, no se encontraron estudios que indicaran la precisión no sólo de los datos, sino de la idoneidad desde el punto de vista geográfico de su localización, para ser utilizado en la construcción de estos

umbrales empíricos. Se destaca la implementación de un método estadístico basado en estructuras numéricas difusas, que considera la incertidumbre de este tipo de medición, no sólo para establecer su confiabilidad, sino también para corroborar la idoneidad de la localización espacial de la estación. La metodología propuesta es un hecho comprobado en este estudio y un argumento sólido para su utilización a futuro.

Los procesos de medición y registro de mediciones deben ir actualizándose y dando cabida a nuevas formas de cuantificación coherentes con limitaciones naturales en las cuales intervenga el ser humano. Por otro lado, se debe comenzar a reconocer la imprecisión en los procesos de medición y, por lo tanto, las interpretaciones y análisis deben realizarse en conocimiento de este factor. Introducir la cuantificación difusa en los procesos de medición de precipitaciones o remociones en masa es un salto cualitativo y cuantitativo en la comprensión de estos fenómenos, en el cual la aleatoriedad e imprecisión siempre estarán presentes.

Probabilidad igual a uno, no es sinónimo de certeza, y menos si los eventos que caracterizan mi espacio muestral están sumergidos en imprecisión.

RECONOCIMIENTOS

Trabajo elaborado en el marco del proyecto de investigación: CNE 08-1617 de la Dirección General de Investigación, Universidad de Playa Ancha- Chile. Los

Tabla 2. *Umbrales*

Cotas	Erikson 2004	SERNAGEOMIN
15 mm/24 horas	Pueden ocurrir	Ha ocurrido al menos una remoción en masa
35 mm/24 horas	Frecuentemente	Pueden ocurrir algunas
50 mm/24 horas	Casi con seguridad	La posibilidad de ocurrencia de varias es muy alta

Nota: Fuente de elaboración propia.



autores agradecen al Centro Meteorológico de la Armada de Chile y al Laboratorio de Meteorología, del Instituto de Geografía de la Universidad Católica de Valparaíso, por facilitar los datos meteorológicos utilizados en este estudio. Se suma el agradecimiento a la Unidad de Soporte Estadístico de la Universidad de Playa Ancha.

DECLARACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

El porcentaje total de contribución para la conceptualización, preparación y corrección de este artículo fue el siguiente: J.G.C. 40 %, C.R.G. 40 % y C.C.M. 20 %.

DECLARACIÓN DE DISPO- NIBILIDAD DE LOS DATOS

Los datos que respaldan los resultados de este estudio serán puestos a disposición por el autor correspondiente J.G.C, previa solicitud razonable.

REFERENCIAS

- Aleotti, P. (2004). A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Engineering Geology*, 73 (3-4), 247-265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007>
- Biasutti, M., Seager, R., & Kirschbaum, D. B. (2016). Landslides in West Coast metropolitan areas: The role of extreme weather events. *Weather and Climate Extremes*, 14, 67-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.11.004>
- De Barros, L., & Bassanezi, R. (2006). Tópicos de lógica Fuzzy E biomatemática. *IMECC-Unicamp*. Campinas (In Portuguese). <https://bit.ly/36RSkXL>
- Dubois, D., & Prade, H. (1978). Operations on fuzzy numbers. *International Journal of Systems Science*, 9, 613-626. doi: <https://doi.org/10.1080/00207727808941724>

- Dubois, D., Kerre, E., Mesiar, R., & Prade, H. (2000). Fuzzy interval analysis. In *Fundamentals of fuzzy sets* (pp. 483-581). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4429-6_11
- Dubois, D., & Prade, H. (1982). On Several Representations of an Uncertain Body of Evidence. In *Fuzzy Information and Decision Processes*, 167-181. Elsevier, Amsterdam.
- Erikson, I., & Högstedt, J. (2004). *Landslide Hazard Assessment and Landslide Precipitation Relationship in Valparaíso*. Department of Physical Geography. Central Chile. <https://bit.ly/2TobDE8>
- Foti, S. (2012). Combined use of Geophysical Methods for Geotechnical Site Characterization. *4th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization Recife*. Brasil.
- Fisher, R.A. (1922). On the mathematical foundations of theoretical statistics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 222, 309-368. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.1922.0009>
- González, J. A., Castro, L. M., Lachos, V. H., & Patriota, A. G. (2016). A confidence set analysis for observed samples: a fuzzy set approach. *Entropy*, 18(6), 211. doi: <https://doi.org/10.3390/e18060211>
- Hauser, A. (2000). *Remociones en masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín n.º 59. Santiago, Chile.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado., & Baptista-Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación* (No. 303.1). McGraw-Hill Education,
- Hoff, P. A. (2009). *First Course in Bayesian Statistical Methods*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-92407-6>
- Ma, Chao, Wang., Yujie, Hu., Kaiheng, Du, Cui., & Yang, Wentao. (2017). Rainfall intensity-duration threshold and erosion competence of debris flows in four areas affected by the 2008 Wenchuan earthquake, *Geomorphology*, 288, 85-95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.012>
- Martínez, C. (1994). *Diagnóstico de riesgo de inundación y deslizamientos de laderas en la ciudad de Valparaíso a través de sistema de información geográfico*. UPLA.



- Mauris, G. (2009). Possibility distribution: A unified representation for parameter estimation. *In Proceedings of the Joint IFSA-EUSFLAT*, 1589-1594. Conference, Lisbon, Portugal.
- Neyman, J. (1956). Note on an article by Sir Ronald Fisher. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 18(2), 288–294. doi: <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1956.tb00236.x>
- Nasseri, S., Taleshian, F., Alizadeh, Z., & Vahidi, J. (2012). A New Method for Ordering LR Fuzzy Number. *The Journal of Mathematics and Computer Science*, 4(3), 283–294. <https://doi.org/10.22436/jmcs.04.03.01>
- Namakforoosh, M. N. (2000). *Metodología de la investigación*. Editorial Limusa.
- Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P., & Guzzetti, F. (1998). Regional hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River Basin (Central Italy). *Environ Geol*, 35(2-3), 146-159. <https://doi.org/10.1007/s002540050301>
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Inf. Control*, 8, 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zadeh, L. A. (1999). Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy sets and systems*, 100, 9-34. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(99\)80004-9](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)80004-9)



Representación difusa del umbral de precipitaciones en el desencadenamiento de procesos de remoción en masa (José González-Campos • Carlos Romero-González • Cristian Carvajal-Muquillaza) **Uniciencia** is protected by [Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported \(CC BY-NC-ND 3.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/)