

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea del CRAI-Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la CRAI-Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

Evaluación del riesgo de inundaciones y movimientos en masa asociado al fenómeno de La Niña en el departamento de Santander

Ricardo Esteban Gutiérrez Torres

**Trabajo de grado para optar el título de
Magíster en Ciencias y Tecnologías Ambientales**

Director

Juan David Gutiérrez Torres

Biólogo Ph.D.

Universidad Santo Tomás

División de Ingenierías y Arquitectura

Maestría en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Facultad de Química Ambiental

2019

*Dedicado a mi familia por ser el pilar fundamental
en mi vida, por su apoyo incondicional que me han
brindado a través del tiempo.*

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Agradecimientos

Mis más sinceros agradecimientos a Juan David director de este trabajo y hermano incondicional.

Tabla de Contenidos

	pág.
Introducción	10
1. Título del trabajo	12
1.1 Definición del problema	12
1.2 Justificación	13
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo general	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
2. Marco referencial	16
2.1 Clima, variabilidad climática y el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur - ENOS	16
2.2 Amenazas naturales (movimientos en masa e inundaciones) y las alteraciones en la precipitación.	18
2.3 Amenaza, vulnerabilidad y riesgo.	19
2.4 Modelos de evaluación de movimientos en masa e inundaciones.	20
2.5 Evaluación multicriterio EMC.	22
2.6 Matriz de evaluación del riesgo RAM.	22
3. Método	23
3.1 Marco geográfico.	23
3.2 Obtención de datos de las variables de evaluación y análisis.	23
4. Resultados y Discusión	29
4.1 Análisis de la susceptibilidad del departamento a inundaciones y movimientos en masa.	29
4.2 Análisis de las alteraciones más probables de la precipitación por efecto del fenómeno de La Niña en el departamento.	29
4.3 Evaluación del nivel de amenaza a inundaciones y movimientos en masa por efecto del fenómeno de La Niña en el departamento.	35
4.4 Municipios con mayores amenazas a inundaciones y movimientos en masa por efecto del fenómeno de La Niña	36
4.4.1 Municipios con mayores amenazas a inundaciones	36
4.4.2 Municipios con mayores amenazas a movimientos en masa	37
4.5 Evaluación de la vulnerabilidad en el departamento.	37
4.5.1 Municipios con mayor vulnerabilidad	38
4.6 Evaluación de las áreas de mayor riesgo de inundaciones por efecto del fenómeno de La Niña en el departamento.	41
4.7 Evaluación de las áreas de mayor riesgo de movimientos en masa por efecto del fenómeno de La Niña en el departamento.	41
5. Conclusiones	50
6. Recomendaciones	52
Referencias Bibliográficas	54

Lista de tablas

	pág.
Tabla 1. <i>Variables, indicadores, valores y pesos asignados para la estandarización de la amenaza.</i>	26
Tabla 2. <i>Variables, indicadores, valores y pesos asignados para la estandarización de la vulnerabilidad.</i>	27
Tabla 3. <i>Eventos del fenómeno de la niña con la mayor amenaza a inundaciones y movimientos en masa.</i>	36
Tabla 4. <i>Detalle de los factores de amenaza y vulnerabilidad para los municipios con mayor área en riesgo alto de inundaciones.</i>	43
Tabla 5. <i>Detalle de los factores de amenaza y vulnerabilidad para los municipios con mayor área en riesgo muy alto a movimientos en masa.</i>	46

Lista de figuras

	pág.
Figura 1. Matiz de evaluación del riesgo.	28
Figura 2. Esquema metodológico para la identificación del riesgo de inundaciones y movimientos en masa asociados al fenómeno de La Niña para el departamento de Santander.	28
Figura 3. Consolidado de áreas del departamento de Santander afectadas por las alteraciones más probables de la precipitación en presencia de un fenómeno de la niña de variada intensidad.	31
Figura 4. Mapa de alteración más probable de la precipitación para un fenómeno de La Niña de intensidad Fuerte 3T1A.	33
Figura 5. Mapa de alteración más probable de la precipitación para un fenómeno de La Niña de intensidad Fuerte 1T2A.	34
Figura 6. Mapa de vulnerabilidad para el departamento de Santander.	39
Figura 7. Mapa de vulnerabilidad para el sector provincia García Rovira.	40
Figura 8. Mapa con el mayor riesgo a inundaciones para un fenómeno de La Niña Fuerte 1T2A en el departamento de Santander.	42
Figura 9. Mapas con el mayor riesgo a movimientos en masa para un fenómeno de La Niña Fuerte 3T1A en el departamento de Santander.	45

Resumen

Este documento evalúa el riesgo hidrológico de movimientos en masa e inundaciones por efecto de la alteración de la precipitación debida al fenómeno de La Niña de variada intensidad en el departamento de Santander – Colombia. El desarrollo metodológico consistió en una evaluación espacial multicriterio utilizando el método de suma ponderada en ArcGis, para los mapas digitales de susceptibilidad, alteración de la precipitación y vulnerabilidad. Cada indicador fue ponderado, procesado y analizado en función de su contribución a la amenaza y la vulnerabilidad respectivamente. Para la evaluación del riesgo se aplicó una matriz de doble entrada de la información relacionada a las categorías de amenaza y vulnerabilidad. Los resultados de las zonas de mayor riesgo de movimientos en masa e inundaciones fueron analizados a nivel departamental y municipal. Se encontró que el mayor riesgo de inundaciones se registra en el primer trimestre del segundo año para un evento de La Niña de intensidad fuerte, donde Puerto Wilches es el municipio con mayor afectación. A su vez, el mayor riesgo de movimientos en masa se registra en el tercer trimestre del primer año para un evento de La Niña de carácter fuerte, con riesgo muy alto en los municipios de Matanza, San José de Miranda y Molagavita. Los resultados obtenidos constituyen un aporte para el entendimiento del impacto del fenómeno de La Niña sobre el territorio del Departamento de Santander y contribuyen a mejorar la capacidad adaptativa frente a la variabilidad climática que puede ser útil para la toma de decisiones en entidades y oficinas relacionadas con la atención del riesgo y prevención de desastres.

Palabras clave: Amenaza de deslizamientos, análisis de riesgo, evaluación espacial multicriterio, fenómeno ENOS, susceptibilidad a inundaciones, variabilidad climática, vulnerabilidad ambiental.

Abstract

This paper evaluates the hydroclimatic risk of landslides and floods due to the alteration of rainfall due to La Niña phenomenon of varied intensity in the department of Santander - Colombia. The methodological development consisted of a multicriteria spatial evaluation using the weighted sum method in ArcGis, for digital maps of susceptibility, rainfall alteration and vulnerability. Each indicator was weighted, processed and analyzed according to its contribution to the threat and vulnerability respectively. For the risk assessment, a matrix of double entry of the information related to the degree of threat and the level of vulnerability was applied. The results of the areas of greatest risk of landslides and floods were analyzed at the departmental and municipal level. It was found that the greatest risk of floods occurs in the first quarter of the second year for a La Niña event of strong intensity, where the municipality with the most damage is Puerto Wilches. At the same time, the greatest risk of landslides is recorded in the third quarter of the first year for a strong La Niña event, with very high risk in the municipalities of Matanza, San José de Miranda and Molagavita. The results obtained constitute a contribution to the understanding of the impact of the La Niña phenomenon on the territory of the Department of Santander and contribute to improve the adaptive capacity against the climatic variability that can be useful for the decision makers in entities and offices related to Attention to risk and disaster prevention.

Keywords: Landslide hazard, risk analysis, spatial multi-criteria evaluation, ENSO phenomenon, flood susceptibility, climate variability, environmental vulnerability.

Introducción

El Ciclo conocido como El Niño Oscilación del Sur – ENOS, es un fenómeno climático de oscilación de los parámetros meteorológicos en el Océano Pacífico ecuatorial y dispone de dos fases contrastantes, una cálida conocida como El Niño y la otra fría llamada La Niña (Wyrski, 1975).

En Colombia, el fenómeno de La Niña se caracteriza por una disminución en la temperatura del aire, un aumento en la precipitación y la nubosidad, el incremento del caudal de los ríos y un aumento en la humedad de los suelos con respecto al valor promedio mensual, principalmente en las zonas Caribe y Andina (Gutiérrez & Dracup, 2001; Montealegre & Pabón, 2000).

Sumado a lo anterior, el territorio nacional presenta un 6.7% de susceptibilidad muy alta a deslizamientos, 6.9% con susceptibilidad alta y 7.2% con susceptibilidad media (Escobar, 2011). De igual forma, el país cuenta con una superficie periódicamente inundable de 12.4 millones de hectáreas, correspondiente al 9.2% (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, & Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, 2012); condiciones que hacen de Colombia un país propenso al impacto de fenómenos hidroclimáticos extremos que originan deslizamientos, avalanchas, crecientes torrenciales, desbordamientos e inundaciones.

La fuerte temporada de lluvias durante el último fenómeno de La Niña de mayor intensidad, ocurrido entre septiembre de 2010 y mayo de 2011, fue el desencadenante para que se incrementara sustancialmente el número de emergencias por inundaciones y deslizamientos en el país; registrándose 3.5 millones de hectáreas inundadas y 778 deslizamientos, que causaron 1,374 víctimas fatales, 1,016 personas desaparecidas, 3,219,239 personas damnificadas y afectadas;

daños que representaron 11.2 billones de pesos a nivel nacional. En el departamento de Santander, se totalizaron entre víctimas y desaparecidos más de 100 registros, 97,853 damnificados y daños por 643,011 millones de pesos (Banco Interamericano de Desarrollo - BID & Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, 2012).

Una adaptación planificada frente al cambio climático y a la variabilidad climática, mediante la identificación de zonas de riesgo, tiene una mejor relación costo-beneficio, pues actuar de manera preventiva hoy, resulta menos costoso que las pérdidas que se generarían sobre la economía del país por causa de los efectos asociados a eventos meteorológicos extremos como el fenómeno de La Niña. Según el reporte de The Adaptation and Mitigation Strategies Initiative - ADAM (Hulme, Neufeldt, Colyer, & Ritchie, 2009), la adopción de medidas de adaptación en la planificación territorial podrían reducir en cerca del 2.5% del PIB global los costos residuales debido al cambio climático.

En Colombia, solo durante los últimos años se han llevado a cabo una serie de investigaciones sobre la evaluación y adaptación al riesgo de eventos hidroclimáticos extremos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM et al., 2012; MINISTERIO DE TRANSPORTE et al., 2014). Sin embargo, dichos estudios se han realizado para unos sectores específicos y en ciertas regiones del país. Es por ello, que se hace procedente para el departamento de Santander, una evaluación de los escenarios posibles de afectación detonados por el fenómeno de La Niña, que permita identificar las áreas de mayor riesgo a movimientos en masa e inundaciones, con el fin de establecer oportunamente estrategias de prevención, mitigación y adaptación, destinadas a reducir su impacto sobre la población.

1. Título del trabajo

Evaluación del riesgo de inundaciones y movimientos en masa asociado al fenómeno de La Niña en el departamento de Santander.

1.1 Definición del problema

El último fenómeno de La Niña de mayor intensidad en el departamento de Santander de acuerdo con la Misión BID –CEPAL (Banco Interamericano de Desarrollo - BID & Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, 2012) dejó de forma resumida los siguientes impactos:

- 169,573 hectáreas afectadas, de las cuales el 59% (99,964 ha.) fueron inundaciones extraordinarias entre el periodo 2010-2011, con una afectación de 73,256 hectáreas de uso agropecuario.
- Además de las inundaciones se produjeron importantes deslizamientos y movimientos en masa que agravaron las consecuencias, en particular con daños considerables en infraestructura (vías, viviendas, acueductos, etc.).
- El registro de personas damnificadas y afectadas ascendió a 97,853, con un 74% residente en áreas rurales. De igual forma, se registraron en el departamento 13,422 fincas o parcelas afectadas y 14,683 viviendas, de las cuales el 73.5% se dieron como consecuencia de los efectos asociados a inundaciones y deslizamientos por este fenómeno.
- El total de daños valorados ascendieron a 643,011 millones de pesos, que representó el 1.6% del PIB departamental.

- Santander fue de los departamentos que concentraron más pérdidas con 102,131 millones de pesos, de los cuales 57,844 correspondieron al sector agropecuario, 41,235 al sector infraestructura y el restante a los sectores minería, industria, turismo y sociales.

Frente a los impactos presentados en el último fenómeno de La Niña de mayor intensidad, a nivel departamental no se dispone de una herramienta para la identificación, cuantificación y priorización de las posibles zonas de mayor riesgo de afectación por movimientos en masa e inundaciones ante un futuro fenómeno de La Niña.

El no disponer de este tipo de herramientas dificulta la labor de las autoridades y organismos departamentales relacionados con la atención y prevención del riesgo; y por tanto su capacidad de respuesta ante un evento de esta magnitud se ve limitada principalmente a la atención de las personas afectadas y al levantamiento de información de daños causados a la infraestructura y al sector productivo.

El problema de investigación que se desea abordar está relacionado con ¿Cuáles son las zonas del departamento, municipios y extensión de cada uno de ellos, con mayor riesgo ambiental por movimientos en masa e inundaciones asociados al efecto del fenómeno de La Niña?

1.2 Justificación

Debido a los efectos presentados como consecuencia del fenómeno de La Niña 2010-2011, que ocasionaron daños a nivel nacional valorados en 11,2 billones de pesos de acuerdo con el informe de la Misión BID – Cepal (Banco Interamericano de Desarrollo - BID & Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL, 2012), se hace procedente para el departamento de Santander, el diseño de una matriz de riesgo ambiental para el análisis de los escenarios posibles

de afectación por movimientos en masa e inundaciones detonados por el efecto del fenómeno de La Niña, que permita identificar las áreas de mayor de riesgo, con el fin de establecer oportunamente estrategias de prevención, mitigación y adaptación, destinadas a reducir su impacto.

Un importante resultado de este tipo de estudios es un mejoramiento en la capacidad de desarrollar estrategias de adaptación, promulgar información para priorizar acciones de forma temprana y mejorar la capacidad de respuesta específica frente a eventuales fenómenos de La Niña en el departamento, que permitan generar estrategias de intervención para mitigar su impacto.

Igualmente este tipo de investigación se encuentra alineada con las directrices definidas por el Departamento Nacional de Planeación y el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, para la elaboración de los Planes de Ordenamiento Territorial, los Planes de Gestión del Riesgo a nivel departamental y municipal y los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Territoriales (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2014).

Dentro de la formulación de los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Territoriales y los Planes de Gestión del Riesgo de Desastres, se plantea como estrategia la gestión del riesgo ambiental y social frente al cambio climático y la variabilidad climática, cuyo objetivo es valorar, analizar y planear las diferentes situaciones de riesgo para enfrentar estos fenómenos mediante acciones y obras dirigidas a su mitigación y adaptación.

Disponer de una herramienta que permita identificar con antelación las zonas de mayor riesgo, así como su extensión ante posibles movimientos en masa e inundaciones inducidos por efecto del fenómeno de La Niña, facilitaría a las entidades departamentales y locales tomar medidas para la prevención de desastres y la priorización en la atención de este tipo de emergencias.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el riesgo de inundaciones y movimientos en masa en el departamento de Santander – Colombia, asociados a episodios del fenómeno de La Niña de variada intensidad, con el uso de sistemas de información geográfica – SIG.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Analizar el comportamiento de las alteraciones en la precipitación por efecto del fenómeno de La Niña de variada intensidad y su incidencia sobre el departamento de Santander.
2. Establecer el nivel de susceptibilidad y amenaza a inundaciones y movimientos en masa por efecto de las alteraciones más probables en la precipitación, causadas por el fenómeno de La Niña en el departamento de Santander.
3. Evaluar la vulnerabilidad física, social, económica y ambiental, y establecer su distribución espacial en el departamento.
4. Identificar las zonas de mayor riesgo de inundaciones y movimientos en masa asociados a las alteraciones de la precipitación por efecto del fenómeno de La Niña.

2. Marco referencial

2.1 Clima, variabilidad climática y el fenómeno de El Niño Oscilación del Sur - ENOS

El clima es el conjunto de las condiciones atmosféricas que se presentan de manera fluctuante y que se caracteriza por los estados y evoluciones del tiempo en un lugar o región determinado durante un período de tiempo relativamente largo.

El clima varía en escalas de tiempo y espacio. De mucho tiempo atrás se han presentado fluctuaciones del clima en diversas escalas de tiempo. Estas variaciones se generan principalmente, por alteraciones en la forma de interacción entre los distintos componentes del sistema climático y por cambios en los factores que determinan el forzamiento radiativo, expresado como la diferencia entre la insolación (luz solar) absorbida por la Tierra y la energía irradiada devuelta al espacio (Montealegre, 2009).

En climatología se utiliza para definir y comparar el clima, la normal climática, que es una medida que generalmente representa el valor promedio de una serie continua de observaciones de una variable climatológica durante un periodo de por lo menos 30 años. La diferencia entre el valor de la variable en determinado momento y su promedio se le denomina anomalía. En evaluaciones climáticas durante diferentes años, los valores de las variables climatológicas (temperatura, precipitación, etc.) fluctúan por encima o por debajo de lo normal. La frecuencia de estas oscilaciones alrededor de los valores normales, se conoce como variabilidad climática, su valoración se logra mediante la determinación de las anomalías y se presenta en ciclos de diversa escala temporal: intraestacional, interanual e interdecadal (Montealegre & Pabón, 2000).

Dentro de las fluctuaciones temporales del clima se encuentran las variaciones que se presentan en las variables climatológicas de año en año o interanual. La variabilidad climática enmarcada dentro de esta escala corresponde entre otros a los fenómenos definidos dentro del ciclo ENOS (El Niño - La Niña - Oscilación del Sur).

La alteración de la precipitación por efecto de la Oscilación del Sur El Niño (ENSO por sus siglas en Ingles) es un fenómeno climático de fluctuación de los parámetros meteorológicos en el Océano Pacífico ecuatorial, compuesto de dos fases contrastantes; una cálida conocida como El Niño y la otra fría llamada La Niña (Wyrтки, 1975). Estas alteraciones por encima o por debajo de lo normal de la estructura térmica superficial y subsuperficial del océano, están asociadas en el caso de El Niño, con el debilitamiento de los vientos alisios del Este y con el desplazamiento del núcleo de convección profunda del Oeste al Centro del Océano Pacífico tropical; y en el caso de La Niña, con su permanencia e intensificación. Es por ello que el ciclo ENOS, es la causa de la mayor variabilidad climática interanual en la franja tropical del océano Pacífico, produciendo fuertes alteraciones sobre la circulación atmosférica global y sus efectos climáticos tienen serias implicaciones socioeconómicas y ambientales en la mayor parte del planeta (Dai & Wigley, 2000; Kiladis & Diaz, 1989; McBride & Nicholls, 1983; Ropelewski & Halpert, 1987; Shabbar, Bonsal, & Khandekar, 1997).

Esta oscilación de la temperatura es simultáneamente oceánica y atmosférica, y se encuentra relacionada con el fenómeno atmosférico denominado Oscilación del Sur, que consiste en una oscilación de la presión atmosférica en el Pacífico sur (Australia).

En Colombia durante un fenómeno de El Niño se observan una serie de alteraciones que incluyen: un incremento de la temperatura del aire, disminución en la cantidad de precipitación, disminución del caudal de los ríos y disminución de la humedad de los suelos con respecto a los

valores promedio, particularmente en las zonas central y caribe. Durante un fenómeno de La Niña se aprecia una menor temperatura del aire, un incremento en la precipitación y la nubosidad, aumento en el caudal de los ríos y una mayor humedad en los suelos con respecto al valor promedio mensual, principalmente en las zonas caribe y central (Gutiérrez & Dracup, 2001; Ropelewski & Halpert, 1987).

2.2 Amenazas naturales (movimientos en masa e inundaciones) y las alteraciones en la precipitación.

Aunque los movimientos en masa ocurren como consecuencia de las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas y la modificación de las mismas por procesos geodinámicos, remoción de la capa vegetal, uso del suelo y actividades antrópicas; los detonantes de dichos eventos están dados por la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad de la zona (Cornforth, 2005).

El principal factor asociado con las fallas en los taludes es el agua, ya que la inmensa mayoría de los movimientos en masa ocurren durante los períodos de lluvia o después de lluvias intensas. La explicación más común sobre el efecto del agua en los deslizamientos, es que las lluvias saturan el talud por infiltración a través del suelo, induciendo a una reducción en las fuerzas de fricción, lo que activa el deslizamiento. De igual forma, pueden existir otras fuentes de agua diferentes a la infiltración del agua lluvia, tales como: canales, cañadas o lagunas, que si están ubicados en la parte superior del talud, pueden generar infiltración. Existe una extensa documentación sobre la amenaza de movimientos en masa y la relación directa entre las precipitaciones y el desencadenamiento de deslizamientos de tierra (Cascini, Cuomo, Pastor, & Sorbino, 2009; Rianna,

Pagano, & Urciuoli, 2014; Sorbino & Nicotera, 2013; Xue & Gavin, 2008; Zhang, Zhang, Zhang, & Tang, 2011).

De otra parte, la mayor parte de las inundaciones ocurren ya sea cuando se presenta un deshielo repentino de glaciares de montaña o estacionalmente debido a fuertes lluvias en regímenes tropicales y subtropicales. Las fuertes precipitaciones en la cabecera de las cuencas y la deforestación provocan intensos escurrimientos con una gran cantidad de material de arrastre y sedimentos en suspensión, lo cual conlleva modificaciones en los cauces, reduciendo su área hidráulica.

Los asentamientos humanos en las zonas bajas y costeras ponen de relieve la necesidad de reducir los riesgos potenciales y avanzar en las técnicas de gestión de las inundaciones. Los recientes desarrollos en las ciencias hidrológicas y meteorológicas brindan la oportunidad de nuevas mejoras en la predicción de inundaciones, la gestión del riesgo de inundación, la mejora de los sistemas de alerta contra inundaciones y la gestión integrada de los recursos hídricos (International Council for Science Regional Office for Asia and the Pacific, 2008).

2.3 Amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

La amenaza y la vulnerabilidad son los determinantes claves del riesgo de desastres; la variabilidad de la amenaza y la vulnerabilidad están bien documentadas en la literatura (Wisner, Blaikie, Cannon, & Davis, 2003).

La amenaza es el peligro potencial de que un fenómeno físico de origen natural o inducido por la acción del hombre de manera accidental, se presente con una severidad suficiente que pueda causar pérdida de vidas, afectaciones en la salud de las personas, así como también daños y

pérdidas de bienes, infraestructura, servicios y recursos ambientales (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, 2012).

La vulnerabilidad corresponde a la fragilidad o propensión interna que tiene la población y sus bienes a sufrir daños ante la presencia de una amenaza. Es un concepto multidimensional que incluye exposición, (nivel de contacto con una amenaza particular); sensibilidad (el grado de afectación por la exposición a una amenaza) y resiliencia (capacidad para resistir o recuperarse del daño asociado con una amenaza).

La vulnerabilidad comprende no solo los elementos potencialmente afectados o factores físicos, sino que además tiene en cuenta aspectos ambientales, junto con el contexto socioeconómico y político en el cual se encuentran. Así mismo, la vulnerabilidad se considera dinámica y cambiante, es diferenciada pues no afecta por igual a los diferentes actores (Gómez, 2001).

2.4 Modelos de evaluación de movimientos en masa e inundaciones.

Diferentes modelos han sido desarrollados con el objetivo de analizar la susceptibilidad a movimientos en masa, usando modelos determinísticos y probabilísticos. Los modelos probabilísticos son los de uso más frecuente y un gran número de metodologías han sido desarrolladas, basadas en inventarios de deslizamientos, análisis geomorfológicos, análisis bivariados cualitativos y cuantitativos, así como análisis multivariados. Muchos investigadores han utilizado diferentes técnicas como aproximaciones heurísticas, modelos determinísticos y métodos estadísticos (Oh & Pradhan, 2011; Sezer, Pradhan, & Gokceoglu, 2011; Yilmaz, 2009).

Estas aproximaciones se agrupan en tres clases principales: estadísticas, computacionales y métodos analíticos. Cuando el área de estudio es relativamente grande, los métodos analíticos son casi imposibles de implementar. Por esta razón, los métodos estadísticos y computacionales han presentado un incremento gradual en su uso, más aun cuando la implementación de estos métodos en Sistemas de Información Geográfica - SIG es relativamente de fácil manejo y aplicación.

Para el análisis de la susceptibilidad a inundaciones, se tienen en cuenta las condiciones climáticas de la región, el uso del suelo, la evaluación del comportamiento morfodinámico e hidrológico, junto con criterios estadísticos y técnicas de percepción remota (Mendoza Mejía & Orozco Hernández, 2014).

La zonificación como una herramienta útil para la toma de decisiones, radica esencialmente en la división del terreno en áreas homogéneas y la posterior calificación de cada una de estas de acuerdo con el grado real o potencial de riesgo o amenaza. Desde la década de los 90's la zonificación de riesgos y amenazas se realiza con la ayuda de SIG's y sensores remotos (Carrara, Cardinali, Guzzetti, & Reichenbach, 1995; Van Westen, Rengers, Terlien, & Soeters, 1997). El mapeo puede realizarse en áreas donde se tiene información histórica de la ocurrencia de derrumbes e inundaciones, o cuando no se dispone de información histórica de eventos ocurridos en el pasado pero se desea conocer la posibilidad de amenazas futuras. Para la primera condición, es posible trabajar en el mapeo directo con base en la información y registros previos y para el segundo caso, se puede realizar un mapeo indirecto analizando los factores que contribuyen a su ocurrencia.

2.5 Evaluación multicriterio EMC.

El Método de Evaluación Multicriterio aplica los elementos del proceso de análisis jerárquico desarrollado por Saaty (Saaty, 1980) y es utilizado para resolver problemas complejos de criterios múltiples, siendo de gran utilidad para investigar el territorio y contribuir en la gestión sustentable de los recursos naturales. Se trata de una técnica que evalúa un conjunto de unidades espaciales a la luz de múltiples criterios y prioridades en conflicto. Geográficamente, las alternativas suelen ser representadas como un conjunto de porciones del territorio que son evaluadas con base en sus características ambientales, sociales o económicas (Barredo Cano, 1996).

La evaluación multicriterio se realiza considerando el método de sumatoria lineal ponderada, que es a una operación aritmética simple de tipo compensatorio aditivo (Gómez & Barredo, 2005). El cual consiste en multiplicar el valor de cada criterio (coberturas georreferenciadas y normalizadas en escala de 0 y 1) por su peso. Dicho método se aplica para el estudio a los factores y subfactores, tanto para la vulnerabilidad, amenaza y riesgo.

2.6 Matriz de evaluación del riesgo RAM.

La Matriz de Evaluación de Riesgo (*RAM* por sus siglas en inglés *Risk Assessment Matrix*) es considerada una de las herramientas más extendidas para la evaluación de riesgos y ayudan a la priorización en la toma de decisiones con la que cada uno de estos riesgos debe ser manejado. Se utilizan principalmente para determinar el nivel o magnitud de un riesgo a partir de la integración ortogonal de dos dimensiones, la severidad de los daños o vulnerabilidad y la probabilidad de ocurrencia o amenaza. La combinación de estas dos dimensiones crea una matriz de riesgo, con al

menos tres áreas identificadas: (a) De baja probabilidad de ocurrencia o amenaza y baja vulnerabilidad o gravedad (generalmente de color verde) que indica el riesgo de un evento que no es lo suficientemente alto. (b) De alta probabilidad o amenaza y alta vulnerabilidad o severidad (usualmente de color rojo) que indica un evento de alto riesgo. (c) De categoría media (generalmente de color amarillo) que se encuentra entre las dos áreas anteriores y se considera que cualquier evento que se encuentra en esta área por lo general necesita ser analizado pero no es de prioridad en la toma de decisiones (Brown, 2012).

3. Método

3.1 Marco geográfico.

El estudio se realizó en el departamento de Santander, ubicado al nororiente de Colombia entre los 05°42'34'' y 08°07'58'' de latitud norte, y los 72°26' y 74°32' de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 30,537 km² lo que representa el 2.7% del territorio nacional. La topografía es principalmente montañosa, con un relieve quebrado y de pendientes fuertes al oriente del departamento, mientras que al occidente el relieve es plano y suavemente ondulado, correspondiente al valle medio del río Magdalena.

3.2 Obtención de datos de las variables de evaluación y análisis.

Se realizó la selección de las capas temáticas a partir de la consulta de mapas digitales disponibles en los geoservicios y geoportales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios

Ambientales – IDEAM; Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC; Sistema de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial – SIGOT y Servicio Geológico Colombiano - SGC.

Todos los análisis geospaciales realizados en el estudio fueron desarrollados con el software ArcGis versión 10.2.1.

Para la clasificación de la intensidad de los eventos del fenómeno de La Niña se utilizó el índice relacionado con la anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM) (Montealegre, 2014), que define la intensidad de los eventos como: débiles, moderados o fuertes, con base en la desviación estándar de la serie de anomalías de la temperatura superficial del mar en la región Niño 3, para los rangos entre -0.79 a -1.06°C como débil, -1.07 a -1.33°C como moderado y $< -1.33^{\circ}\text{C}$ como fuerte.

En lo que respecta a la evaluación de la amenaza, se tuvieron en cuenta como factores condicionales el mapa de zonas susceptibles a inundación periódica del IDEAM y el mapa de susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa del SGC; como factor desencadenante se utilizaron los mapas de alteración más probable de la precipitación debida al fenómeno de La Niña de variada intensidad, obtenidos por Montealegre (Montealegre, 2014), cuyo análisis consistió en calcular los índices trimestrales que permiten detectar variaciones del comportamiento de la precipitación con respecto a la media multianual del periodo 1961-2012. Las alteraciones fueron calculadas como el cociente, expresado en porcentaje (%), entre un dato cualquiera y su valor promedio multianual y para la interpolación de las alteraciones de la precipitación se utilizó el método del inverso de la distancia.

En el análisis de la vulnerabilidad se siguieron los criterios definidos por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – UNPD (Pelling et al., 2012), Abella y Van Westen (Abella

& Van Westen, 2007) y el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM et al., 2014), que incluyen factores físicos, sociales, económicos y ambientales, que son combinados para obtener un índice cualitativo.

Para el estudio fueron seleccionadas ocho capas temáticas: cinco para evaluar la infraestructura física expuesta (red vial, puentes, red de oleoductos, red de alta tensión y cascos urbanos), tomadas del IGAC y el SIGOT; una para establecer la vulnerabilidad de las zonas agrícolas (adaptado del mapa de coberturas de la tierra del IDEAM 2012), una que establece las condiciones de vida de la población (mapa de índice de condiciones de vida – ICV del SIGOT) y una que determina de forma integral los niveles de desarrollo y la capacidad institucional municipal, construido a partir de la información de las tipologías municipales del Departamento Nacional de Planeación – DNP (Sánchez, González, & Villamil, 2015).

El desarrollo metodológico para la evaluación de la amenaza y vulnerabilidad a inundaciones y movimientos en masa, asociados al fenómeno de La Niña en del departamento de Santander; consistió en una evaluación espacial multicriterio, considerando el método de suma ponderada (Gómez & Barredo, 2005). Dicho método se aplicó para las diferentes capas temáticas seleccionadas, donde cada indicador fue estandarizado en un rango de 0-1 y ponderado de acuerdo al peso asignado en función de su contribución a la amenaza y la vulnerabilidad respectivamente (Tablas 1 y 2).

Las categorías asignadas a los valores de amenaza y vulnerabilidad después del procesamiento de los datos, se establecieron así: baja para los valores entre 0 – 0.33, media con valores entre 0.34 – 0.66 y alta con valores entre 0.67 – 1.00.

Tabla 1. *Variables, indicadores, valores y pesos asignados para la estandarización de la amenaza.*

Aspecto evaluado	Factor (Peso)	Capa temática	Variables examinada	Indicador	Normalización	Ponderación
Amenaza	Condicional (0.5)	Zonas susceptibles a movimientos en masa	Grado de susceptibilidad	No susceptible	0.00	0.00
				Baja	0.25	0.125
				Media	0.50	0.25
		Alta		0.75	0.375	
		Muy Alta		1.00	0.50	
		No inundable		0.00	0.00	
	Desencadenante (0.5)	Zonas susceptibles a inundación periódica	Grado de susceptibilidad	Inundable	1.00	0.50
				Débil - Excedente	0.10	0.05
				Débil – Excedente severo	0.20	0.10
		Moderado - Excedente		0.40	0.20	
		Moderado – Excedente severo		0.60	0.30	
		Fuerte - Excedente		0.80	0.40	
Fuerte – Excedente severo	1.00	0.50				

Nota: Elaboración propia.

Para la determinación del nivel de riesgo se aplicó una Matriz de Evaluación de Riesgo, similar a la utilizada por la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD (UNGRD & PNUD, 2012), en la cual se integraron los valores de amenaza a inundaciones y a movimientos en masa, asociados a las mayores alteraciones de la precipitación por efecto del fenómeno de La Niña de variada intensidad, con los valores de vulnerabilidad. Las calificaciones de riesgo de los diferentes polígonos resultantes, correspondieron a la integración de las categorías de amenaza y vulnerabilidad establecidas en la Figura 1. Con esta información se elaboraron los respectivos mapas de riesgo de inundaciones y de riesgo de movimientos en masa, por efecto de un fenómeno de La Niña de variada intensidad.

Tabla 2. Variables, indicadores, valores y pesos asignados para la estandarización de la vulnerabilidad.

Aspecto evaluado	Factor (Peso)	Capa temática	Variables examinada	Indicador	Normalización	Ponderación	
Vulnerabilidad	Físico (0.05)	Red vial	Tipo de vía	Carreteable	0.33	0.0165	
				Carretera sin pavimentar	0.66	0.033	
				Carretera pavimentada	1.00	0.05	
		Físico (0.05)	Red de distribución y refinamiento	Oleoductos y poliductos	Línea ductos	1.00	0.05
					Físico (0.25)	Cascos urbanos	Cascos urbanos
		Físico (0.05)	Red alta tensión	Red alta tensión	Líneas alta tensión	1.00	0.05
		Físico (0.05)	Puentes	Puentes	Puentes	1.00	0.05
		Ambiental (0.1)	Coberturas de la tierra	Zonas agrícolas	Cultivos semipermanentes y permanentes	0.10	0.01
					Asociaciones de rastrojos, cultivos y pastizales	0.25	0.025
					Pastos	0.50	0.05
	Áreas agrícolas heterogéneas				0.75	0.075	
	Cultivos anuales o transitorios				1.00	0.10	
	ICV > 80				0.10	0.02	
	ICV = 70,01 - 80				0.33	0.07	
	ICV = 50,01 - 70				0.66	0.13	
	ICV <= 50				1.00	0.20	
	A				0.05	0.0125	
	Social (0.2)	Índice de condiciones de vida - ICV	Rango de puntaje municipal del ICV	B	0.16	0.04	
				C	0.32	0.08	
				D	0.48	0.12	
E				0.64	0.16		
F				0.80	0.20		
G				1.00	0.25		
Económico (0.25)				Tipología municipal	Categoría tipológica municipal		

Nota: Elaboración propia.

CALIFICACION DEL RIESGO				
VULNERABILIDAD	ALTO	ALTO - BAJO = MEDIO	ALTO - MEDIO = ALTO	ALTO - ALTO = MUY ALTO
	MEDIO	MEDIO - BAJO = MEDIO	MEDIO - MEDIO = MEDIO	MEDIO - ALTO = ALTO
	BAJO	BAJO - BAJO = BAJO	BAJO - MEDIO = MEDIO	BAJO - ALTO = MEDIO
		BAJO	MEDIO	ALTO
AMENAZA				

Figura 1. Matiz de evaluación del riesgo.

Adaptado de la “Guía metodológica para la elaboración de Planes Departamentales de Gestión del Riesgo de la UNGRD”, UNGRD & PNUD. (2012).

En la Figura 2 se presenta el esquema de metodológico desarrollado para la evaluación multicriterio de la condición del riesgo de inundación y movimientos en masa asociados al fenómeno de La Niña en el departamento de Santander.

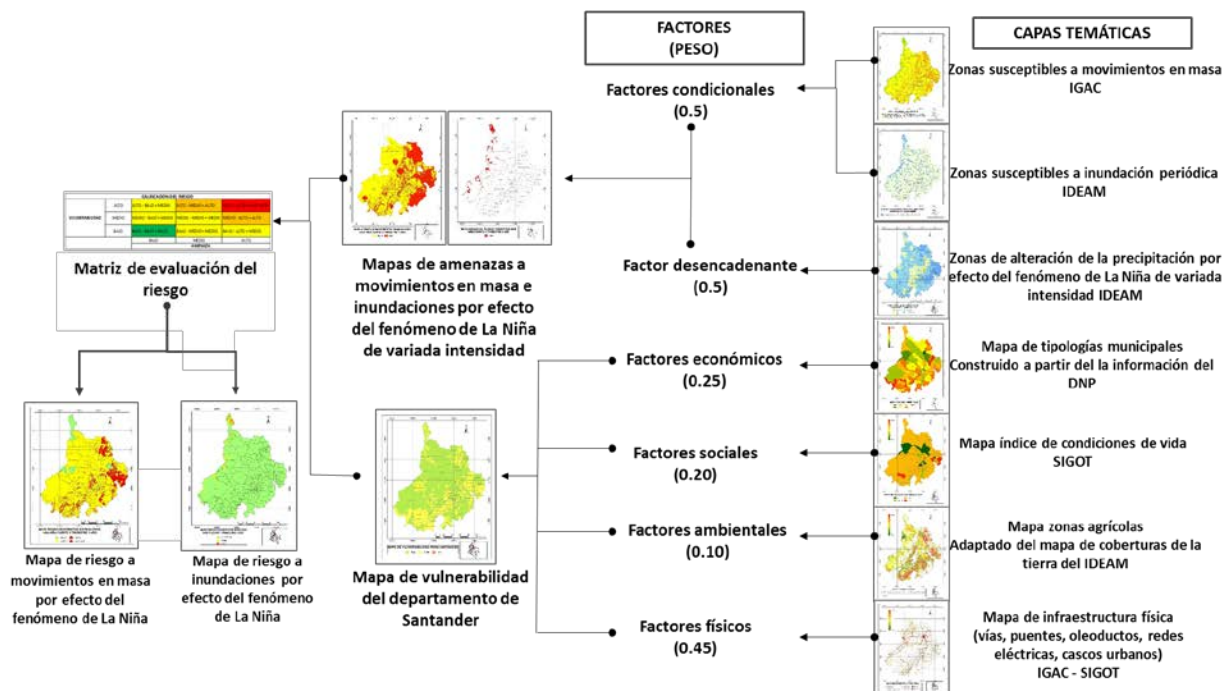


Figura 2. Esquema metodológico para la identificación del riesgo de inundaciones y movimientos en masa asociados al fenómeno de La Niña para el departamento de Santander.

Elaboración propia.

4. Resultados y Discusión

4.1 Análisis de la susceptibilidad del departamento a inundaciones y movimientos en masa.

Como resultado del análisis del mapa de zonas susceptibles a inundación periódica, se encontró que el departamento de Santander presenta 421.63 Km² de zonas correspondientes a cuerpos de agua (1.38% del área departamental) y presenta 845.80 Km² de zonas inundables periódicamente, que representa el 2.77% del territorio departamental; ubicados en su gran mayoría al costado occidental en el valle del Magdalena medio. De igual forma, realizado el análisis del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, el territorio santandereano presenta 8.98 Km² de terreno con muy alta susceptibilidad a movimientos en masa (0.03% del área), 6,510.08 Km² con alta susceptibilidad (21.30%), 21,699.81 Km² con susceptibilidad media (70.99%), 2,268.03 Km² con baja susceptibilidad (7.42%) y tan solo 42.29 Km² con muy baja susceptibilidad (0.14%). Lo que convierte al departamento de Santander en un territorio con una muy marcada susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos de inundación y movimientos en masa, dada por la fisiografía del terreno y por el uso del suelo que se ha dado.

4.2 Análisis de las alteraciones más probables de la precipitación por efecto del fenómeno de La Niña en el departamento.

En la evaluación realizada a los mapas de las alteraciones más probables de la precipitación debida al fenómeno de La Niña de variada intensidad en el departamento de Santander, se encontró

que los eventos de intensidad fuerte durante la fase madura del fenómeno de La Niña, correspondientes al tercer y cuarto trimestre del primer año y primer trimestre del segundo año, por sus siglas Fuerte 3T1A, Fuerte 1T2A y Fuerte 4T1A (Figura 3), presentaron las mayores áreas afectadas con excedentes severos de precipitación (comportamientos pluviométricos con excesos por encima del 60% de lo normal).

Para los eventos moderados se presentó similar tendencia con las mayores alteraciones en la precipitación durante los trimestres de la fase madura del fenómeno (Moderada 1T2A, Moderada 4T1A y Moderada 3T1A); sin embargo, los excedentes en la precipitación son en su mayoría entre el 20% hasta el 60% por encima de lo normal, con muy pocos excedentes severos.

En los eventos débiles el comportamiento de la precipitación prevaleció cercano a lo normal, con excepción de los eventos débiles del segundo trimestre del segundo año (Débil 2T2A), donde se presenta cerca de 17,500 Km² con excedentes en la precipitación (entre el 20% hasta el 60% por encima de lo normal). Así mismo, se presentaron áreas antagónicas donde las alteraciones son deficitarias: eventos Fuertes 2T2A, Moderados 2T2A, Moderados 2T1A, Débiles 4T1A y Débiles 1T2A.

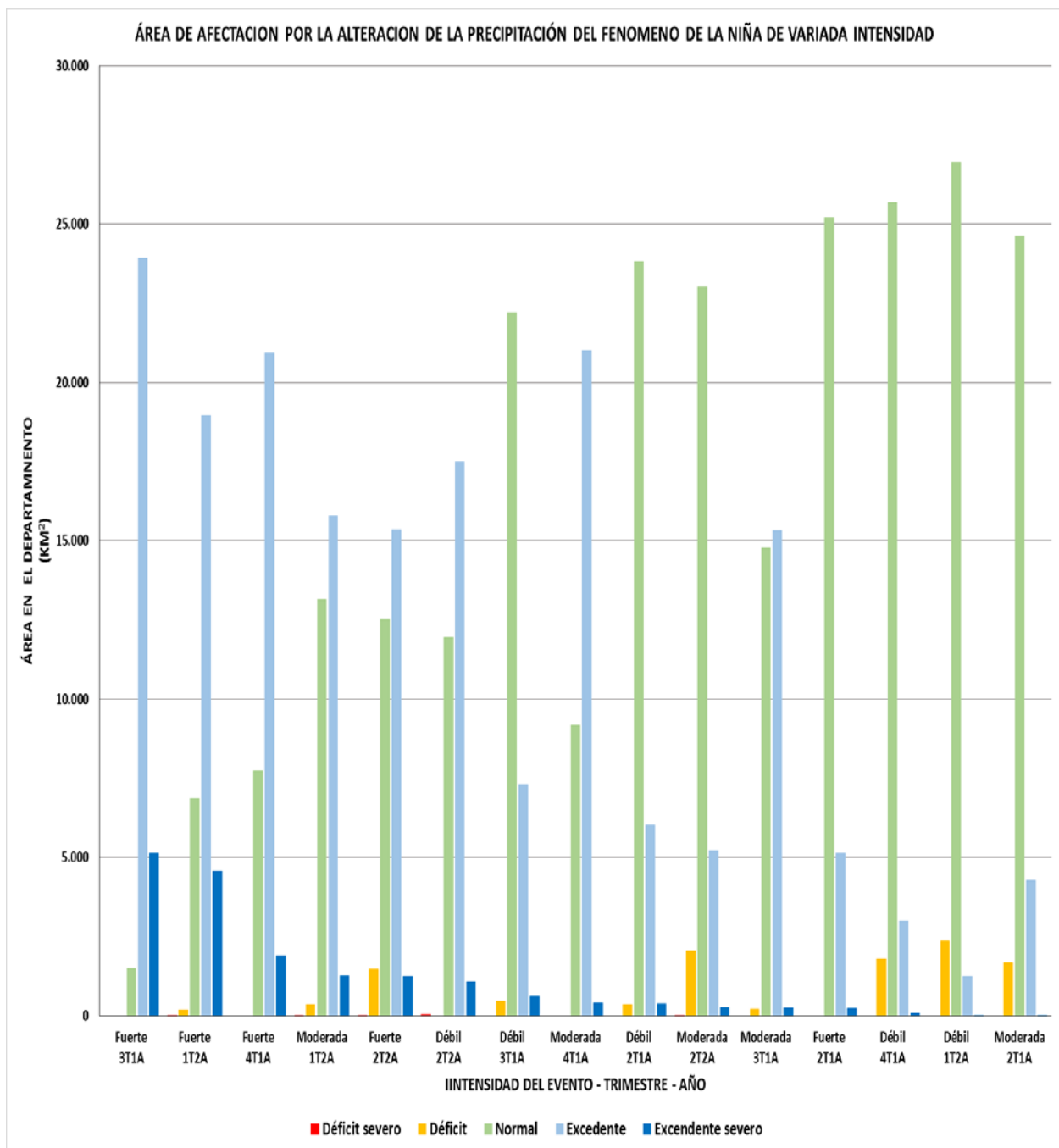


Figura 3. Consolidado de áreas del departamento de Santander afectadas por las alteraciones más probables de la precipitación en presencia de un fenómeno de la niña de variada intensidad.

Nota: Los episodios y los trimestres están ordenados de forma descendente al área afectada en kilómetros con excedente severo

Elaboración propia.

Las Figura 4 y 5 muestra los mapas con los dos eventos que presentaron las mayores alteraciones de la precipitación en el departamento de Santander. El mapa de alteraciones de la precipitación para La Niña fuerte del tercer trimestre del primer año (Fuerte 3T1A), muestra un 78% del área del departamento con un excedente en la precipitación entre el 20% al 60% de lo normal y un 16.80% del área con un excedente severo por encima del 60% de la precipitación normal, principalmente en el costado oriental y nororiental del departamento, junto con algunas zonas aisladas del centro y sur del territorio; así mismo se presentan unos sectores del valle del Magdalena medio y de los municipios de Piedecuesta, Santa Bárbara y Guaca, sin alteraciones en las precipitaciones (Figura 4).

De igual forma, para el mapa de alteración de la precipitación para La Niña fuerte del primer trimestre del segundo año (Fuerte 1T2A), se muestra un 62% del departamento con una alteración de excedencia en la precipitación del 20% al 60% de lo normal y un 14.90% con un excedente severo superior al 60% de la precipitación normal, ubicados en mayor medida en el flanco oriental y nororiental del departamento; adicionalmente se presenta un 22% del territorio, sin alteración en la precipitación, principalmente en el centro del departamento y con algunos sectores aislados con déficit de precipitaciones (Figura 5).

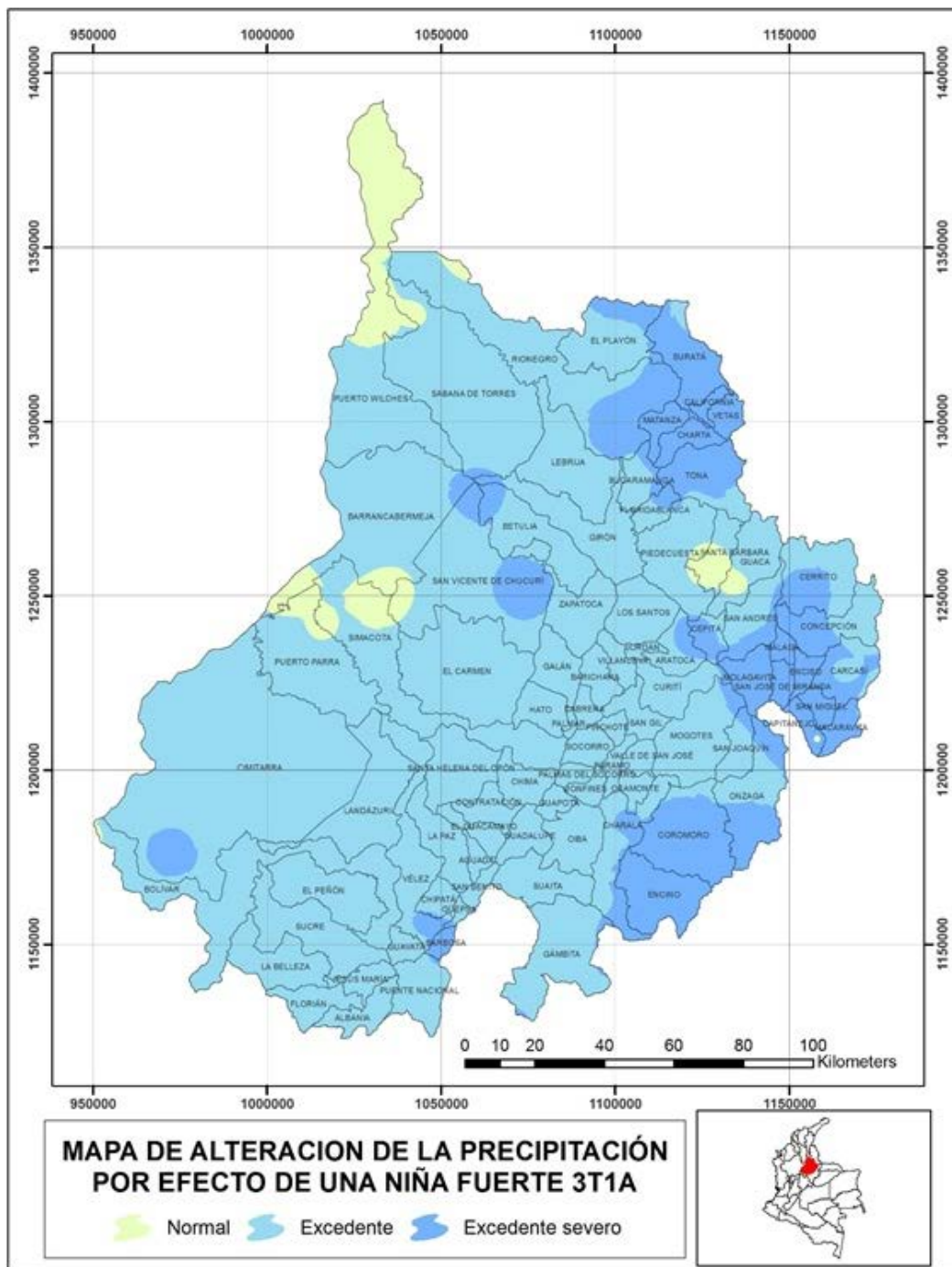


Figura 4. Mapa de alteración más probable de la precipitación para un fenómeno de La Niña de intensidad Fuerte 3T1A. Elaboración propia.

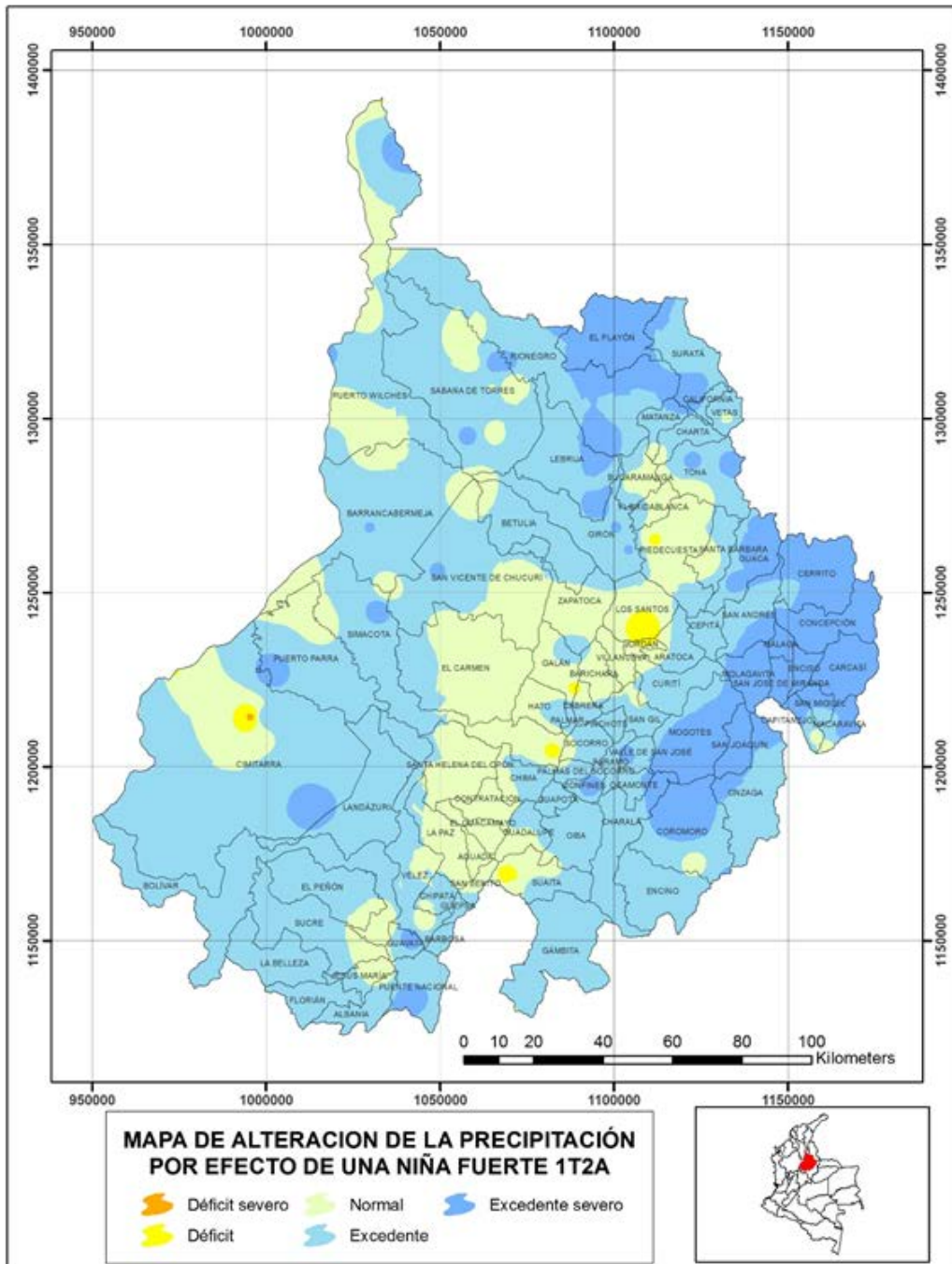


Figura 5. Mapa de alteración más probable de la precipitación para un fenómeno de La Niña de intensidad Fuerte 1T2A. Elaboración propia.

Los resultados anteriormente expuestos, muestran una correspondencia parcial con lo reportado por Arango et al. (Arango, Dorado, Guzmán, & Ruíz, 2014), quienes encontraron que en el primer trimestre de la fase madura de La Niña (ene-mar) y los dos últimos trimestres (nov-ene y dic-feb), se evidenciaron para las estaciones meteorológicas de la región Andina de Colombia, las mayores correlaciones significativas para la precipitación con los índices que caracterizan el Ciclo ENSO. Así mismo, estos autores hallaron que bajo condiciones del fenómeno de La Niña, se mostraron altas probabilidades de presentarse aumentos significativos en los volúmenes de precipitación hacia los trimestres de jun-jul-ago, jul-ago-sep, oct-nov-dic y nov-dic-ene; aspecto que resulta interesante, teniendo en cuenta que se presentan alteraciones de aumento de las precipitaciones durante meses que normalmente corresponden a temporadas secas (ene-feb-mar y jul-ago-sep).

4.3 Evaluación del nivel de amenaza a inundaciones y movimientos en masa por efecto del fenómeno de La Niña en el departamento.

En la Tabla 3 se presentan los resultados de los eventos del fenómeno de La Niña de variada intensidad que mostraron las mayores áreas con amenaza por inundaciones y movimientos en masa. Dichos resultados se obtuvieron después de realizar la evaluación espacial de los mapas de las alteraciones de la precipitación por efecto del fenómeno de La Niña, con los mapas de susceptibilidad a inundaciones y a movimientos en masa en el departamento de Santander.

Los datos de la Tabla 3 muestran que los eventos de intensidad fuerte durante el tercer y cuarto trimestre del primer año y el primer trimestre del segundo año son los que mayor amenaza a inundaciones y movimientos en masa representan en el departamento.

Tabla 3. *Eventos del fenómeno de la niña con la mayor amenaza a inundaciones y movimientos en masa.*

Intensidad - Trimestre – Año	Sigla	Amenaza alta a Inundaciones		Amenaza alta a Movimientos en masa	
		Área afectada (Km ²)	% área del departamento	Área afectada (Km ²)	% área del departamento
La Niña Fuerte durante el 1° trimestre del 2° año	Fuerte1T2A	832.45	2.72	7761.16	25.39
La Niña Fuerte durante el 3° trimestre del 1° año	Fuerte3T1A	747.56	2.45	9288.11	30.39

Nota: Elaboración propia.

4.4 Municipios con mayores amenazas a inundaciones y movimientos en masa por efecto del fenómeno de La Niña

4.4.1 Municipios con mayores amenazas a inundaciones

Los municipios que presentaron las mayores áreas de amenaza alta de inundación por efecto de un evento del fenómeno de La Niña Fuerte 1T2A, se localizaron al noroccidente del departamento en la Provincia de Mares, en los municipios de Puerto Wilches con 313.076 Km² con posibilidad de afectación (20.51% del municipio) y Barrancabermeja con 111.001 Km² (8.87%), así como en el suroccidente del departamento en la Provincia de Vélez, en el municipio de Cimitarra con 218.339 Km² (6.86%). Lo anterior como consecuencia de excedentes en la precipitación superiores al 20%, por efecto del fenómeno de La Niña en las áreas que presentan alta susceptibilidad a inundaciones en estos municipios y que corresponden a cuerpos de agua y zonas inundables periódicamente.

4.4.2 Municipios con mayores amenazas a movimientos en masa

Los municipios que presentaron las mayores áreas de amenaza alta de movimientos en masa por efecto de un evento del fenómeno de La Niña Fuerte 3T1A, se localizaron al suroriente del departamento en la Provincia Guanentá, en los municipios de Coromoro con 551.903 Km² con posibilidad de afectación (95.54% del municipio) y Onzaga con 425.938 Km² (87.24%), así como en el norte del departamento en la Provincia de Soto, en el municipio de Rionegro con 537.981 Km² (40.80%). Lo anterior como consecuencia de excedentes en la precipitación superiores al 20%, por efecto del fenómeno de La Niña.

Desde el punto de vista de la susceptibilidad corresponden a zonas con categorías media, alta y muy alta, en áreas de ladera con pendientes superiores a los 11°, en unidades geomorfológicas de origen denudacional y estructural, con geoformas muy inclinadas a muy escarpadas, con presencia de depósitos coluviales y suelos residuales; son zonas propias para la generación de procesos tipo caída de rocas y suelos, flujos de detritos y de tierras. En estas áreas se presentan procesos erosivos tales como surcos y cárcavas, causados por el mal uso de la tierra y terraceo por la sobrecarga de la producción ganadera y con coberturas de tierra de origen antrópico que no ayudan en la regulación de los flujos de agua, ni en el sostén de los suelos.

4.5 Evaluación de la vulnerabilidad en el departamento.

La evaluación de la vulnerabilidad se realizó integrando las capas temáticas de los factores físicos, ambientales, sociales y económicos definidos en la Tabla 1, con sus correspondientes

indicadores normalizados y ponderados. Los mapas estandarizados resultantes de cada uno de los factores analizados con los valores de vulnerabilidad fueron integrados en un solo mapa (Figura 6), en el cual se encuentra que la mayor parte del territorio correspondiente a 20,977.3 Km² (68.63%) presenta valores bajos de vulnerabilidad, mientras un 31.36% con valores medios de vulnerabilidad (9,584.22 Km²) y tan solo 3.22 Km² con vulnerabilidad alta, ubicados en los cascos urbanos de los municipios con las categorías tipológicas que presentan las mayores debilidades para alcanzar niveles superiores de desarrollo y competitividad (categorías E, F, G tipologías municipales del Departamento Nacional de Planeación – DNP). La Figura 7 presenta ampliado el mapa para la provincia de García Rovira, donde se muestran los sectores de alta vulnerabilidad.

4.5.1 Municipios con mayor vulnerabilidad

Las áreas con mayores valores en el índices de vulnerabilidad (mayor a 0.68) se localizaron al sur del departamento en la Provincia de Vélez, en los municipios de Bolívar con 0.239 Km² (0.02% del municipio) y Sucre con 0.228 Km² (0.05%), así como en el nororiente del departamento en la Provincia de García Rovira, en el municipio de Guaca con 0.534 Km² (0.18%). Desde el punto de vista del índice de vulnerabilidad ambiental estas áreas corresponden a cascos urbanos de municipios con valores en el índice de condiciones de vida por debajo de 58 puntos, en entornos de desarrollo temprano de acuerdo a lo establecido por el DNP.

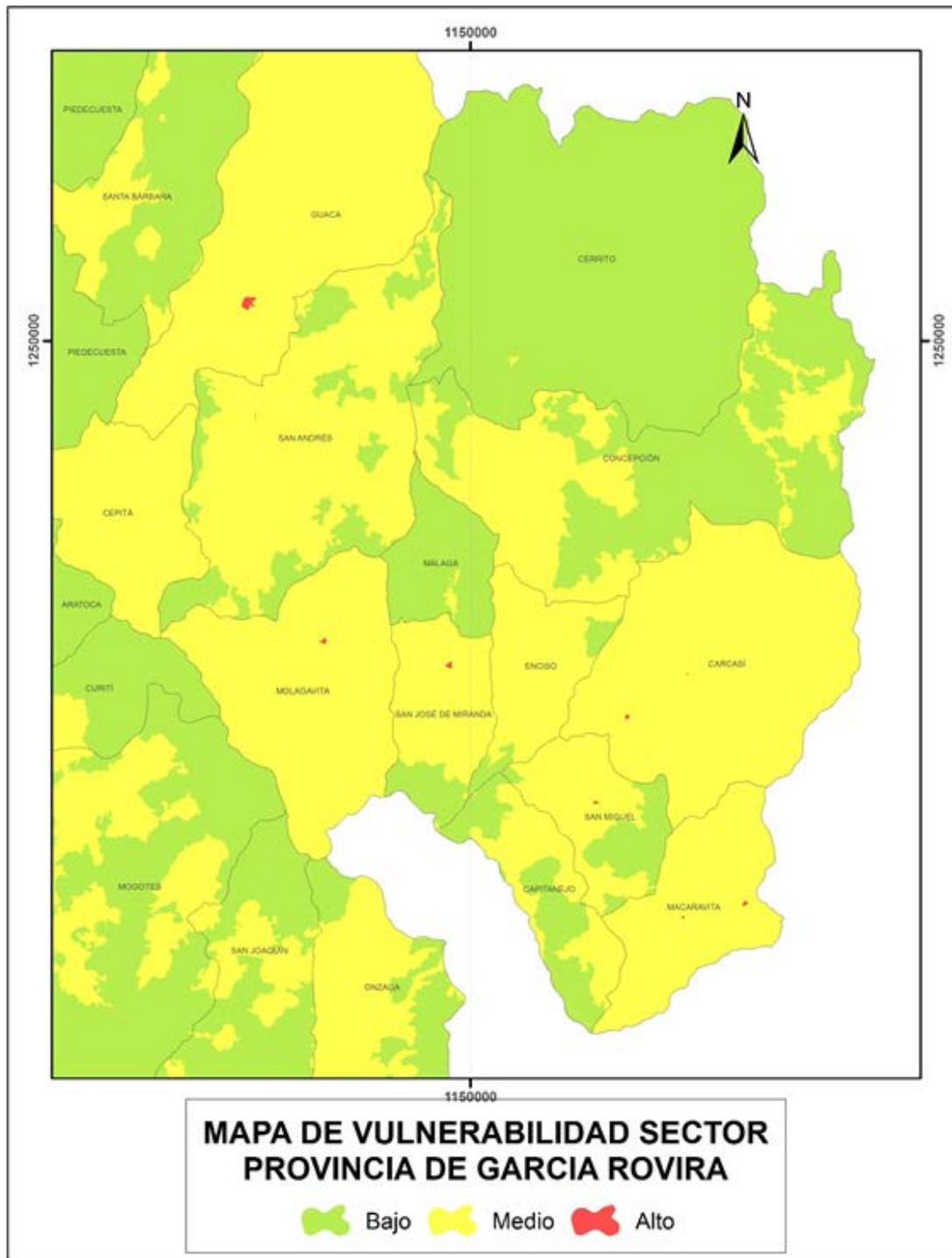


Figura 7. Mapa de vulnerabilidad para el sector provincia García Rovira. Elaboración propia.

4.6 Evaluación de las áreas de mayor riesgo de inundaciones por efecto del fenómeno de La Niña en el departamento.

En la Figura 8 se presenta el mapa con las áreas de mayor riesgo de inundación por efecto de un evento del fenómeno de La Niña Fuerte 1T2A, donde se encontró que 145.31 Km² presentaron riesgo alto de inundación (0.48% del territorio departamental) y 687.14 Km² correspondieron a riesgo medio (2.25% del área del departamento). Los municipios que presentaron las mayores zonas de riesgo alto de inundación fueron: Puerto Wilches con 103.21 Km² (6.76% del área municipal), Simacota con 12.48 Km² (1.27% del municipio) y Bolívar con 7.78 Km² (0.53% del municipio).

En la Tabla 4 se presentan detalles de los factores de amenaza y vulnerabilidad asociados al riesgo alto de inundación por efecto de un evento del fenómeno de La Niña en los tres municipios enunciados anteriormente.

4.7 Evaluación de las áreas de mayor riesgo de movimientos en masa por efecto del fenómeno de La Niña en el departamento.

A su vez, en la Figura 9 se presenta el mapa con las mayores áreas de riesgo a movimientos en masa debido a un evento del fenómeno de La Niña Fuerte 3T1A, donde se encontró que 0.84 Km² presentan riesgo muy alto a movimientos en masa (0.003% del área departamental), 3,416.45 Km² presentaron riesgo alto (11.18% del territorio departamental) y 25,574.67 Km² correspondieron a riesgo medio (83.67% del departamento).

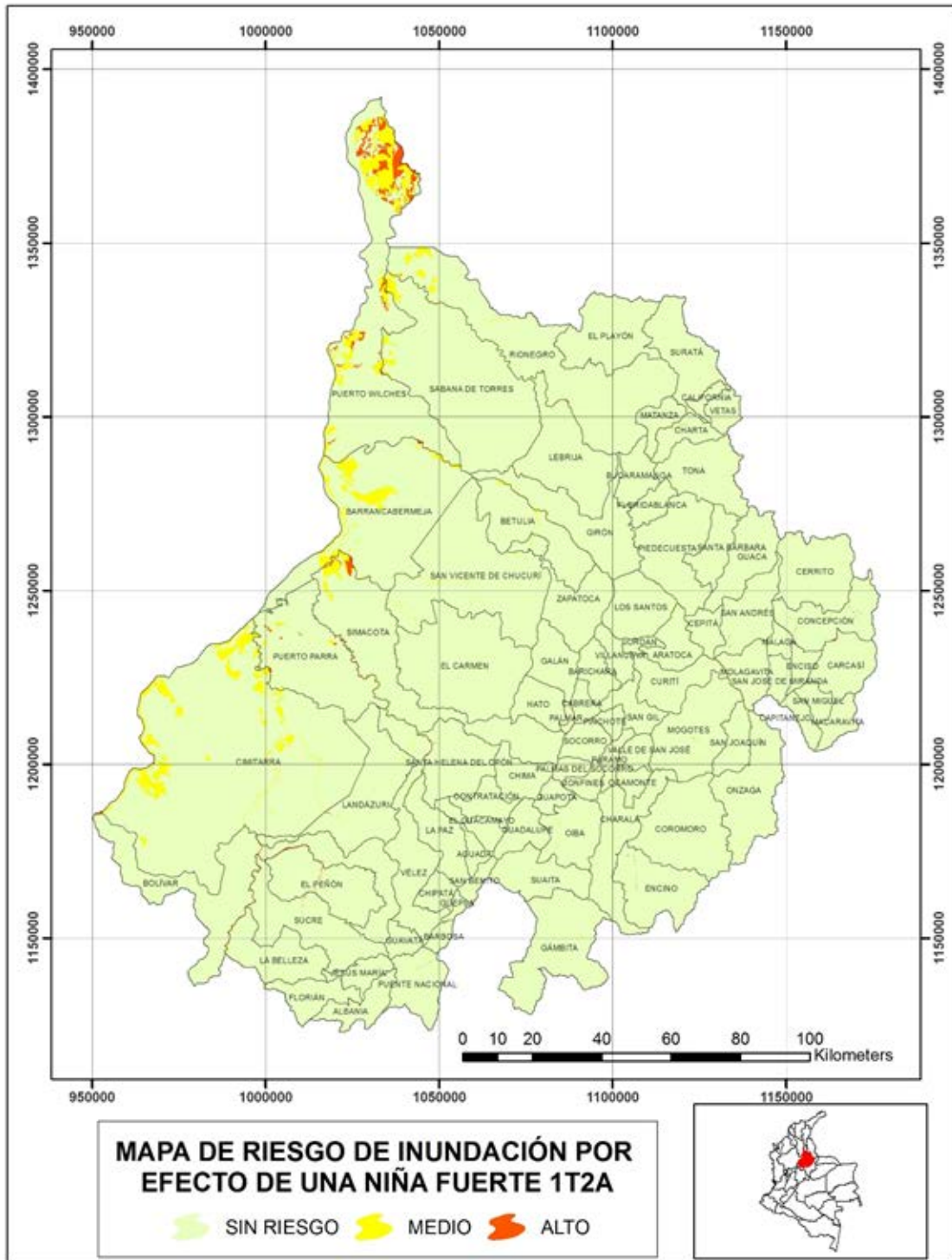


Figura 8. Mapa con el mayor riesgo a inundaciones para un fenómeno de La Niña Fuerte 1T2A en el departamento de Santander.
Elaboración propia.

Tabla 4. *Detalle de los factores de amenaza y vulnerabilidad para los municipios con mayor área en riesgo alto de inundaciones.*

Municipio	Grado amenaza (índice)	Factores de amenaza	Grado de vulnerabilidad (índice)	Factores de vulnerabilidad
Puerto Wilches	Alto (1.0 - 0.90)	Cuerpos de agua y zonas inundables periódicamente, afectados por excedentes en la precipitación superiores al 20%	Medio (0.34 - 0.59)	<p>Ambiental: Áreas con coberturas en pastos, asociadas con rastrojos y cultivos anuales o transitorios y áreas agrícolas heterogéneas.</p> <p>Física: Tramos de poliductos (variante Río Sogamoso - Taladro II Payoa, Payoa - Barrancabermeja, Yariguí - Isla 6); ubicación del casco urbano de Barranca de Lebrija.</p> <p>Social: Índice de condiciones de vida municipal de 66 sobre 100 con valores medios en los perfiles de calidad de vida de los hogares y pobreza en ellos.</p> <p>Económica: Entorno de desarrollo intermedio, con brechas en indicadores sociales, su institucionalidad local requiere esfuerzos principalmente en la capacidad de atracción de inversiones y de generación de recursos propios, se encuentra por debajo del promedio nacional en el indicador de desempeño fiscal.</p>
Simacota	Alto (1.0 - 0.90)	Cuerpos de agua y zonas inundables periódicamente, afectados por excedentes en la precipitación superiores al 20%	Medio (0.35 - 0.43)	<p>Ambiental: Áreas con coberturas en pastos, asociadas con rastrojos y cultivos anuales o transitorios y áreas agrícolas heterogéneas.</p> <p>Física: Puente sobre el Río Opón; carretera pavimentada Ruta del Sol; tramos de poliducto (Barrancabermeja - Sebastopol).</p> <p>Social: Índice de condiciones de vida municipal de 56.18 sobre 100 con valores medios en los perfiles de calidad de vida de los hogares y pobreza en ellos.</p> <p>Económica: Entorno de desarrollo temprano, con brechas en indicadores sociales, apartado y desconectado de los grandes centros urbanos de desarrollo y mercado, con participación muy pequeña en el PIB nacional y con una economía poco especializada, con alta dispersión de la población por ser localidades rurales, baja capacidad de desarrollo de las instituciones locales para lograr transformaciones en los indicadores sociales, se encuentra por debajo del promedio nacional en el indicador de desempeño fiscal.</p>

Municipio	Grado amenaza (índice)	Factores de amenaza	Grado de vulnerabilidad (índice)	Factores de vulnerabilidad
Bolívar	Alto (0.90)	Cuerpos de agua afectados por excedentes en la precipitación superiores al 20%.	Medio (0.38 - 0.48)	<p>Ambiental: Áreas con coberturas en pastos, asociadas con rastrojos y cultivos anuales o transitorios y áreas agrícolas heterogéneas.</p> <p>Física: Tramos de poliducto (Sebastopol - Vasconia).</p> <p>Social: Índice de condiciones de vida municipal de 50.81 sobre 100 con valores medios en los perfiles de calidad de vida de los hogares y pobreza en ellos.</p> <p>Económica: Entorno de desarrollo incipiente, con amplias brechas en indicadores sociales, apartado y desconectado de los grandes centros urbanos de desarrollo y mercado, con mínima participación en el PIB nacional y con una economía poco especializada, con muy alta dispersión de la población por ser localidades en su mayoría rurales, baja capacidad de desarrollo de las instituciones locales para lograr transformaciones en los indicadores sociales, se encuentra por debajo del promedio nacional en el indicador de desempeño fiscal.</p>

Nota: Elaboración propia.

Los municipios que presentaron las mayores áreas de riesgo muy alto de movimientos en masa fueron: Matanza con 0.138 Km² (0.12% del municipio), San José de Miranda con 0.122 Km² (0.15%) y Molagavita con 0.103 Km² (0.05%).

En la Tabla 5 se presentan detalles de los factores de amenaza y vulnerabilidad asociados al riesgo muy alto de movimientos en masa por efecto de un evento del fenómeno de La Niña en los tres municipios enunciados anteriormente.

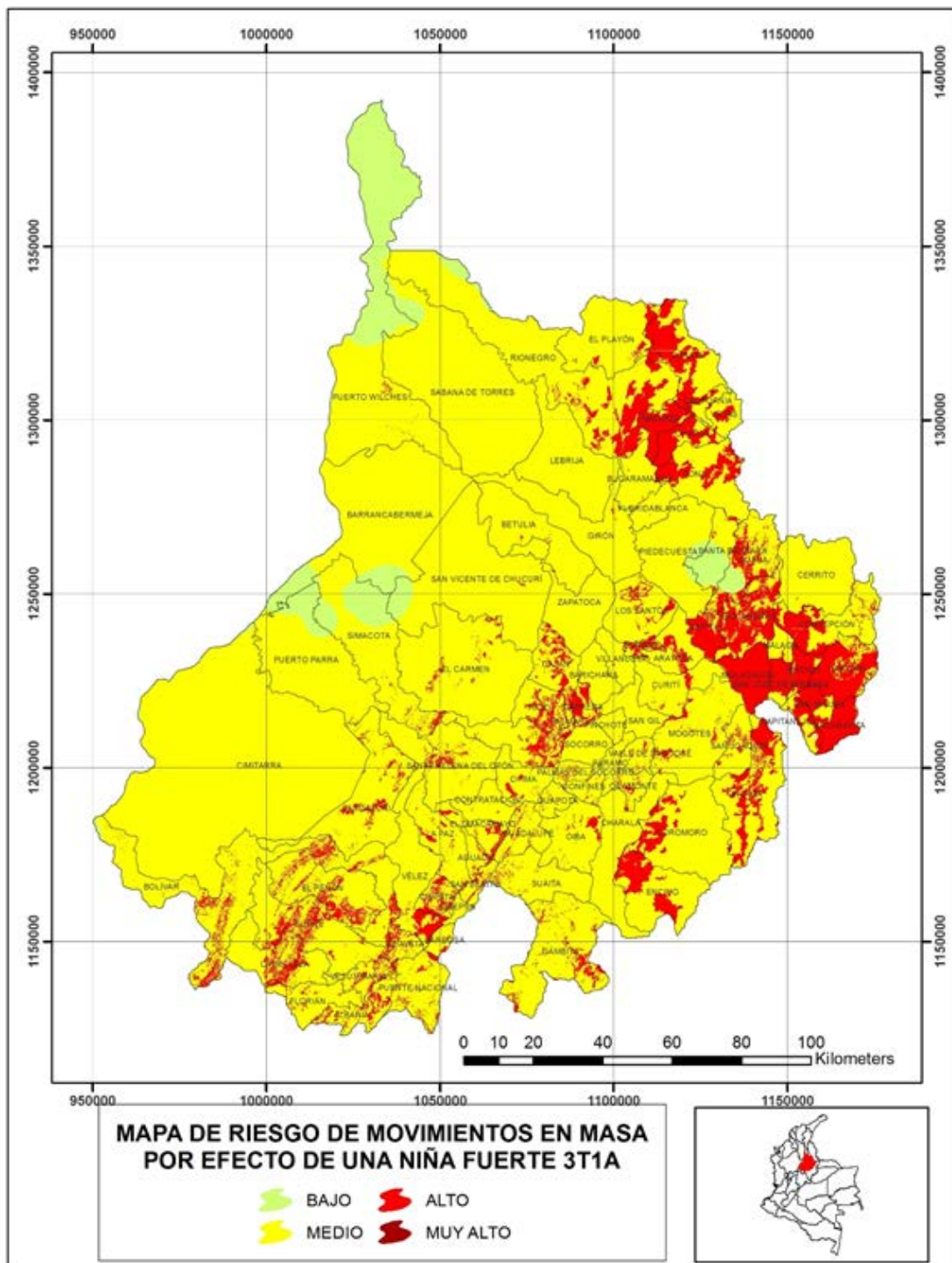


Figura 9. Mapas con el mayor riesgo a movimientos en masa para un fenómeno de La Niña Fuerte 3T1A en el departamento de Santander. Elaboración propia.

Tabla 5. *Detalle de los factores de amenaza y vulnerabilidad para los municipios con mayor área en riesgo muy alto a movimientos en masa.*

Municipio	Grado amenaza (índice)	Factores de amenaza	Grado de vulnerabilidad (índice)	Factores de vulnerabilidad
Matanza	Alto (0.75)	Susceptibilidad media a movimientos en masa, con laderas muy inclinadas a abruptas, con pendientes entre 11° y 19°, afectadas por excedentes severos en la precipitación superiores al 60%	Alto (0.68)	Ambiental: Áreas con coberturas en cultivos anuales o transitorios. Física: Cabecera municipal de Matanza. Social: Índice de condiciones de vida municipal de 58.57 sobre 100 con valores medios en los perfiles de calidad de vida de los hogares y pobreza en ellos. Económica: Entorno de desarrollo temprano, con brechas en indicadores sociales, con participación muy pequeña en el PIB nacional y con una economía poco especializada, con alta dispersión de la población por ser localidades rurales, baja capacidad de desarrollo de las instituciones locales para lograr transformaciones en los indicadores sociales, se encuentra por debajo del promedio nacional en el indicador de desempeño fiscal.
San José de Miranda	Alto (0.875 - 0.75)	Susceptibilidad media a alta a movimientos en masa, con laderas muy inclinadas a muy abruptas y escarpadas, con pendientes entre 11° y 40°, afectadas por excedentes severos en la precipitación superiores al 60%	Alto (0.73 - 0.68)	Ambiental: Áreas cultivos anuales o transitorios. Física: Cabecera municipal de San José de Miranda; carretera intermunicipal. Social: Índice de condiciones de vida municipal de 53.14 sobre 100 con valores medios en los perfiles de calidad de vida de los hogares y pobreza en ellos. Económica: Entorno de desarrollo temprano, con brechas en indicadores sociales, apartado y desconectado de los grandes centros urbanos de desarrollo y mercado, con participación muy pequeña en el PIB nacional y con una economía poco especializada, con alta dispersión de la población por ser localidades rurales, baja capacidad de desarrollo de las instituciones locales para lograr transformaciones en los indicadores sociales, se encuentra por debajo del promedio nacional en el indicador de desempeño fiscal.

Municipio	Grado amenaza (índice)	Factores de amenaza	Grado de vulnerabilidad (índice)	Factores de vulnerabilidad
Molagavita	Alto (0.875 - 0.75)	Susceptibilidad media a alta a movimientos en masa, con laderas muy inclinadas a muy abruptas y escarpadas, con pendientes entre 11° y 40°, afectadas por excedentes severos en la precipitación superiores al 60%	Alto (0.74)	<p>Ambiental: Áreas cultivos anuales o transitorios.</p> <p>Física: Cabecera municipal de Molagavita; carretera intermunicipal.</p> <p>Social: Índice de condiciones de vida municipal de 49.39 sobre 100 con valores medios en los perfiles de calidad de vida de los hogares y pobreza en ellos.</p> <p>Económica: Entorno de desarrollo intermedio, con brechas en indicadores sociales, apartado y desconectado de los grandes centros urbanos de desarrollo y mercado, con participación muy pequeña en el PIB nacional y con una economía poco especializada, con alta dispersión de la población por ser localidades rurales, baja capacidad de desarrollo de las instituciones locales para lograr transformaciones en los indicadores sociales, se encuentra por debajo del promedio nacional en el indicador de desempeño fiscal.</p>

Nota: Elaboración propia.

Estos resultados contrastan con la información reportada en la base de datos consolidada de emergencias anuales del Sistema de Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres – SNGRD ¹ y en la base de datos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres – Desinventar ²; dado que al analizar los reportes de inundaciones para los años 1988-1989, 2007-2008 y 2010-2011, catalogados por Montealegre (Montealegre, 2014) como años de ocurrencia de

¹ Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. (s. f.). Recuperado 19 de julio de 2017, de <http://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=376>

² Sistema de Inventario de Desastres - DesInventar Project - Official Website. (s. f.). Recuperado 23 de julio de 2017, de <http://www.desinventar.org/es/database>

episodios de La Niña de intensidad fuerte, se registraron 246 eventos de inundación en el departamento de Santander, de los cuales tan solo 9 se presentaron durante el primer trimestre del segundo año (1T2A) de los fenómenos de La Niña evaluados, con un solo evento de ellos reportado en el municipio de Simacota (correspondiente a uno de los municipios que se identificaron en el estudio como de mayor riesgo a inundaciones). Mientras que la mayor cantidad de emergencias registradas en las bases de datos analizadas, se reportaron durante el cuarto trimestre del primer año (4T1A) y segundo trimestre del segundo año (2T2A) de los episodios de La Niña estudiados, con 61 y 62 eventos de inundación respectivamente.

Así mismo, se evidenció en las bases de datos analizadas, que el mayor número de eventos de inundación en los municipios identificados con mayor riesgo, ocurrieron durante el tercer trimestre del primer año (3T1A), de los episodios de La Niña evaluados, con 7 eventos registrados, 5 de ellos en el municipio de Puerto Wilches y 2 en el municipio de Simacota.

Sin embargo, de acuerdo con lo reportado por Poveda, et al. (Poveda, Velez, & Mesa, 2000) (Poveda, Jaramillo, Gil, Quiceno, & Mantilla, 2001), se presenta una correlación entre el índice de la temperatura superficial del mar (TSM) región Niño 3 y Niño 4, de un trimestre determinado, y los caudales de los ríos en Colombia, para ese mismo trimestre y los dos trimestres siguientes (principalmente en la zona Andina). Esto debido al efecto de integración espacial que se da en las cuencas hidrográficas en el proceso lluvia-escorrentía, donde el fenómeno de La Niña influye no solo en la precipitación, sino también en las tasas de evaporación real y la humedad del suelo. Lo cual podría explicar en parte los resultados obtenidos en el presente estudio, donde los eventos de mayor riesgo a inundaciones se estarían presentando durante la fase madura del fenómeno de La Niña, en el primer trimestre del segundo año (1T2A).

De igual forma, los resultados obtenidos en el estudio con relación al riesgo a movimientos en masa, contrastan con los reportes de emergencias registrados en las bases de datos mencionadas; por cuanto se registraron 158 eventos en el departamento de Santander, de los cuales tan solo 9 se presentaron durante el tercer trimestre del primer año (3T1A), de los episodios del fenómeno de La Niña analizados, con un solo evento de ellos reportado en Matanza (correspondiente a uno de los municipios identificados en el estudio como de mayor riesgo a movimientos en masa). Mientras que el mayor número de emergencias registradas en las bases de datos analizadas, se presentaron durante el cuarto trimestre del primer año (4T1A) y segundo trimestre del segundo año (2T2A) de los fenómenos de La Niña estudiados, con 58 y 36 eventos de movimientos en masa respectivamente.

Así mismo, se evidenció en las bases de datos mencionadas, para los episodios de La Niña analizados, que el mayor número de eventos de movimientos en masa ocurridos en los municipios identificados con riesgo muy alto, se presentaron durante el segundo trimestre del segundo año (2T2A), con 4 eventos registrados. Es así como, durante el segundo trimestre del segundo año (2T2A), los eventos se registraron en los municipios de Molagavita (2), San José de Miranda (1) y Matanza (1).

No obstante, conforme a lo reportado por Poveda, et al. (Poveda et al., 2010), quienes analizando la humedad del suelo durante el fenómeno de La Niña en el periodo 1998-2000; evidenciaron que la humedad del suelo alcanzó valores de saturación a lo largo de todo el periodo analizado, lo que podría estar explicando en cierta forma los resultados encontrados en el presente estudio, donde los eventos de mayor riesgo de movimientos en masa se estarían presentando en el tercer trimestre del primer año (3T1A), probablemente al encontrarse una saturación en la

humedad de los suelos como consecuencia de los excedentes en la precipitación por efecto del fenómeno de La Niña.

5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados, se encontró que se registraron alteraciones en la precipitación de forma variada en el departamento de Santander, durante los diferentes eventos del fenómeno de La Niña analizados. Sin embargo, los eventos con mayores excedentes de carácter severo (comportamientos pluviométricos con excesos por encima del 60% de lo normal) correspondieron a fenómenos de intensidad fuerte, que se presentaron durante los dos trimestres que habitualmente son temporadas secas (tercer trimestre: jul-ago-sep y primer trimestre: ene-feb-mar), así como en el cuarto trimestre que corresponde a la segunda temporada normal de lluvias en la zona andina colombiana (oct-nov-dic), lo cual permitió tener un mayor entendimiento del fenómeno de La Niña en el departamento de Santander.

Conforme con los resultados del presente estudio, se encontró que de los tres municipios que presentaron las mayores áreas de amenaza alta a inundaciones por efecto de un evento del fenómeno de La Niña Fuerte 1T2A (Puerto Wilches, Barrancabermeja y Cimitarra), solo el municipio de Puerto Wilches presenta un riesgo alto a inundaciones, esto debido al mayor grado de vulnerabilidad que presenta. Así mismo, se encontró que en los municipios de Simacota y Bolívar, pese a no presentar las mayores áreas de amenaza alta presentaron riesgo alto a inundaciones, esto debido al mayor grado de vulnerabilidad en que se encuentran.

Dicha vulnerabilidad en el municipio de Puerto Wilches está caracterizada desde el punto de vista ambiental por presentar coberturas del suelo con pastos, rastrojos, cultivos anuales o

transitorios y áreas agrícolas heterogéneas; en el aspecto físico por la presencia de tramos de poliductos (variante Río Sogamoso - Taladro II Payoa, Payoa - Barrancabermeja, Yariguí - Isla 6) y la ubicación del casco urbano de Barranca de Lebrija; en el aspecto social por presentar valores medios en las condiciones de calidad vida municipal y de pobreza (66 puntos sobre 100); y aspectos económicos en los cuales el municipio presenta un entorno de desarrollo intermedio, con brechas en indicadores sociales, una institucionalidad local que requiere esfuerzos principalmente en la capacidad de atracción de inversiones y de generación de recursos propios, con un indicador de desempeño fiscal por debajo del promedio nacional.

De otra parte, se encontró que de los tres municipios que presentaron las mayores áreas de amenaza alta a movimientos en masa debido a un evento del fenómeno de La Niña Fuerte 3T1A (Coromoro, Onzaga y Rionegro), ninguno presentó un riesgo muy alto a movimientos en masa. Los tres municipios con mayores áreas de riesgo muy alto a movimientos en masa asociados al evento del fenómeno de La Niña de categoría fuerte durante el mismo trimestre y año (3T1A) Matanza, San José de Miranda y Molagavita, pese a no presentar las mayores áreas de amenaza alta presentaron riesgo muy alto, debido a la condición de alto grado de vulnerabilidad en que se encuentran.

La vulnerabilidad de estos municipios está caracterizada desde el punto de vista ambiental por presentar coberturas del suelo con cultivos anuales o transitorios; en el aspecto físico por la ubicación del casco urbano en zonas de muy alto riesgo de movimientos en masa; en el aspecto social por presentar valores bajos en las condiciones de calidad vida y de pobreza (valores entre 58.57 y 49.39 sobre 100); y aspectos económicos en los cuales los municipios presentan entornos de desarrollo entre intermedio y temprano, con brechas en indicadores sociales, baja capacidad de

desarrollo de las instituciones para lograr transformaciones en los indicadores sociales, con un indicador de desempeño fiscal por debajo del promedio nacional.

Los valores del índice de amenaza para los municipios con mayor área en riesgo alto de inundaciones del presente estudio se encuentran por encima de 0.90 y con índices de vulnerabilidad entre 0.34 y 0.59. Por su parte, los índices de amenaza para los municipios con mayor área en riesgo muy alto de movimientos en masa se encuentran por encima de 0.75 y con índices de vulnerabilidad entre 0.68 y 0.74.

6. Recomendaciones

Se recomienda para el caso de las inundaciones, realizar estudios que evalúen las correlaciones entre las alteraciones más probables de la precipitación debida al fenómeno de La Niña de variada intensidad, con la variación en los caudales máximos de los principales ríos del departamento, en las zonas que presentaron los mayores riesgos de inundación, para diferentes periodos de retorno. De la misma manera para los riesgos de movimientos en masa, se recomienda realizar estudios donde se analicen los cambios en los umbrales detonantes de deslizamientos por efecto de las lluvias presentadas durante los fenómenos de La Niña de variada intensidad.

Así mismo, se recomienda para próximos estudios el uso de sensores remotos para estimar las anomalías en la precipitación que permitan reducir la incertidumbre generada por los vacíos en los datos de la información suministrada por el IDEAM, teniendo en cuenta la débil cobertura espacial que existe en la red de estaciones meteorológicas en algunas zonas del departamento.

El estudio permitió identificar las zonas del departamento de Santander que presentan los mayores riesgos a inundaciones y movimientos en masa, como efecto de las alteraciones más

probables en la precipitación debidas al fenómeno de La Niña de intensidad fuerte en el departamento de Santander, a partir de las variables examinadas y los pesos asignados para su análisis. Sin embargo, los resultados alcanzados en este estudio no son estáticos, debido a que varios de los indicadores y variables utilizadas presentan una variabilidad temporal; por lo cual los mapas de susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo deberán ser actualizados regularmente. De igual forma, se podrán incorporar nuevos indicadores que permitan contar con un modelo más robusto y complejo, dependiendo de los usuarios finales que hagan uso del mismo para la toma de decisiones.

Referencias Bibliográficas

- Abella, E. C., & Van Westen, C. J. (2007). Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides*, 4(4), 311-325. *Recuperado el día 7 de noviembre de 2016 de la World Wide Web: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-007-0087-y>*
- Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., & Ruíz, J. (2014). Variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada al Ciclo El Niño, la Niña-Oscilación del Sur (ENSO). IDEAM. *Recuperado el día 20 de julio de 2017 de la World Wide Web: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Variabilidad+Climatica+Trimestral+P+recipitacion+%28Ruiz%2C+Guzman%2C+Arango%2C+Dorado%29.pdf/eec9752d-05ac-43f5-913c-4a3c7adc7860>*
- Banco Interamericano de Desarrollo - BID, & Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL. (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia 2010 – 2011*. Bogotá. *Recuperado el día 24 de enero de 2016 de la World Wide Web: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/0/47330/olainvernalcolombia2010-2011.pdf>*
- Barredo Cano, J. I. (1996). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid: RA-MA.
- Brown, E. T. (2012). Risk assessment and management in underground rock engineering—an overview. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(3), 193-204. *Recuperado el día 9 de noviembre de 2016 de la World Wide Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775515301827>*

- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. En *Geographical information systems in assessing natural hazards* (pp. 135-175). Springer, Dordrecht. *Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web:* http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-015-8404-3_8
- Cascini, L., Cuomo, S., Pastor, M., & Sorbino, G. (2009). Modeling of rainfall-induced shallow landslides of the flow-type. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 85-98. *Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web:* [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000182](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000182)
- Cornforth, D. (2005). *Landslides in practice: investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils*. Wiley.
- Dai, A., & Wigley, T. M. L. (2000). Global patterns of ENSO-induced precipitation. *Geophysical Research Letters*, 27(9), 1283-1286. *Recuperado el día 25 de octubre de 2018 de la World Wide Web:* <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999GL011140>
- Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2014). Bases para la formulación de la Política General de Ordenamiento Territorial. *Recuperado el día 25 de octubre de 2018 de la World Wide Web:* https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Territorial/Bases%20PGOT_Octubre%202014.pdf
- Escobar, Y. C. (2011). Efectos de la Variabilidad Climática (vc) y el Cambio Climático (cc) en los Recursos Hídricos de Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, (9), 33-61.
- Gómez, J. J. (2001). Vulnerabilidad y medio ambiente. Documento presentado en el seminario internacional «Las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y

- el Caribe». *Recuperado el día 7 de noviembre de 2016 de la World Wide Web:*
<http://www.cepal.org/publicaciones/xml/3/8283/jjgomez.pdf>
- Gómez, M., & Barredo, J. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. (2.^a ed.). España: RA-MA.
- Gutiérrez, F., & Dracup, J. A. (2001). An analysis of the feasibility of long-range streamflow forecasting for Colombia using El Niño–Southern Oscillation indicators. *Journal of Hydrology*, 246(1–4), 181-196. *Recuperado el día 24 de enero de 2016 de la World Wide Web:* <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169401003730>
- Hulme, M., Neufeldt, H., Colyer, H., & Ritchie, A. (2009). Adaptation and mitigation strategies: supporting European climate policy. *Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web:* <http://www.mikehulme.org/wp-content/uploads/2009/05/2009-adam-final-report.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, & Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2012). *Memoria técnica: Evaluación, análisis y seguimiento a las afectaciones por inundaciones asociadas al fenómeno de la niña 2010-2011* (p. 204). Bogotá, D. C. *Recuperado el día 21 de julio de 2017 de la World Wide Web:*
<http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/19860>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, Alcaldía de Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, Corporación Autónoma Regional del Guavio - Corpoguavio, ... Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2014). *Vulnerabilidad de la Región Capital a los Efectos del Cambio Climático. Plan*

- Regional Integral de Cambio Climático para Bogotá Cundinamarca (PRICC)*. Bogotá, Colombia. Recuperado el día 14 de julio de 2017 de la World Wide Web: <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/documentacion-e-investigaciones/resultado-busqueda/vulnerabilidad-de-la-region-capital-a-los-efectos-del-cambio-climatico>
- International Council for Science Regional Office for Asia and the Pacific. (2008). *Science Plan on Hazards and Disasters: Earthquakes, Floods and Landslides*. Recuperado el día 7 de noviembre de 2016 de la World Wide Web: <http://www.icsu.org/icsu-asia/publications/science-planning-reports/science-plan-on-hazards-and-disasters/Earthquake-%20Floods%20-%20Landslides.pdf>
- Kiladis, G. N., & Diaz, H. F. (1989). Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 2(9), 1069-1090. Recuperado el día 25 de octubre de 2018 de la World Wide Web: [https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442\(1989\)002%3C1069%3AGCAAWE%3E2.0.CO%3B2f](https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0442(1989)002%3C1069%3AGCAAWE%3E2.0.CO%3B2f)
- McBride, J. L., & Nicholls, N. (1983). Seasonal relationships between Australian rainfall and the Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 111(10), 1998-2004. Recuperado el día 25 de octubre de 2018 de la World Wide Web: [https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493\(1983\)111%3C1998:SRBARA%3E2.0.CO%3B2](https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493(1983)111%3C1998:SRBARA%3E2.0.CO%3B2)
- Mendoza Mejía, J. B., & Orozco Hernández, M. E. (2014). Análisis de la vulnerabilidad biofísica a los riesgos por inundación en la zona metropolitana de Toluca, México. *Luna Azul*, 38, 86-104. Recuperado el día 7 de noviembre de 2016 de la World Wide Web: <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n38/n38a05.pdf>

MINISTERIO DE TRANSPORTE, MADS, DNP, ANI, INVIAS, UNGRD, & IDEAM. (2014).

Plan vías-CC: vías compatibles con el Clima. Plan de Adaptación de la red vial primaria de Colombia (p. 40). Bogotá, Colombia. Recuperado el día 13 de julio de 2017 de la World Wide Web: <https://cdkn.org/project/adaptacion-sector-transporte-colombia/>

Montealegre, J. E. (2009). *Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala* (Informe final).

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Recuperado el día 2 de noviembre de 2018 de la World Wide Web: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Estudio+de+la+variabilidad+clim%C3%A1tica+de+la.pdf/643c4c0e-83d7-414f-b2b4-6953f64078d3>

Montealegre, J. E. (2014). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico*. INSTITUTO DE HIDROLOGIA,

METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, IDEAM. Recuperado el día 23 de marzo de 2016 de la World Wide Web: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o++La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>

Montealegre, J. E., & Pabón, J. D. (2000). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El

Niño-La Niña-Oscilación del Sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia. *Meteorol. Colomb.*, 2, 7-21. Recuperado el día 5 de octubre de 2018 de la World Wide Web: http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero02/02_02.pdf

- Oh, H. J., & Pradhan, B. (2011). Application of a neuro-fuzzy model to landslide-susceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. *Computers & Geosciences*, 37(9), 1264-1276. *Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web:* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300410003377>
- Pelling, M., Maskrey, A., Ruiz, P., Hall, P., Peduzzi, P., Dao, Q. H., ... Kluser, S. (2012). *Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development - A Global Report*. New York, USA: UNPD. *Recuperado el día 14 de julio de 2017 de la World Wide Web:* <http://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/crisis-prevention-and-recovery/reducing-disaster-risk--a-challenge-for-development.html>
- Poveda, G., Álvarez, D., & Rueda, O. (2010). Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2233-2249. *Recuperado el día 22 de julio de 2017 de la World Wide Web:* <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M. M., Quiceno, N., & Mantilla, R. I. (2001). Seasonally in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8), 2169-2178. *Recuperado el día 22 de julio de 2017 de la World Wide Web:* <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2000WR900395>
- Poveda, G., Velez, J. I., & Mesa, O. J. (2000). *Atlas Hidrológico de Colombia* (Informe final) (p. 357). Medellín: Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. *Recuperado el día 22 de julio de 2017 de la World Wide Web:* https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1224/1/Upme_216_AtlasHidrologicoColombia.pdf

- Rianna, G., Pagano, L., & Urciuoli, G. (2014). Rainfall patterns triggering shallow flowslides in pyroclastic soils. *Engineering Geology*, 174, 22-35. Recuperado el día 22 de julio de 2017 de la World Wide Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795214000489>
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1987). Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115(8), 1606-1626. Recuperado el día 7 de noviembre de 2016 de la World Wide Web: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493\(1987\)115%3C1606%3AGARSPP%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493(1987)115%3C1606%3AGARSPP%3E2.0.CO%3B2)
- Saaty, T. L. (1980). *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Sánchez, C. C., González, D. S., & Villamil, I. O. (2015). Tipologías Departamentales y Municipales: Una propuesta para comprender las entidades territoriales colombianas. Departamento Nacional de Planeación - DNP. Recuperado el día 14 de julio de 2017 de la World Wide Web: [https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=/CDT/Desarrollo%20Territorial/Tip-FormatoPublicacion%20\(tipolog%C3%ADas\)%2023.pdf&action=default](https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/_layouts/15/WopiFrame.aspx?sourcedoc=/CDT/Desarrollo%20Territorial/Tip-FormatoPublicacion%20(tipolog%C3%ADas)%2023.pdf&action=default)
- Sezer, E. A., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2011). Manifestation of an adaptive neuro-fuzzy model on landslide susceptibility mapping: Klang valley, Malaysia. *Expert Systems with Applications*, 38(7), 8208-8219. Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417410015307>

- Shabbar, A., Bonsal, B., & Khandekar, M. (1997). Canadian Precipitation Patterns Associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, 10(12), 3016-3027. Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web: [https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0442\(1997\)010%3C3016:CPPAWT%3E2.0.CO%3B2](https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0442(1997)010%3C3016:CPPAWT%3E2.0.CO%3B2)
- Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. (s. f.). Recuperado el día 19 de julio de 2017, de <http://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=376>
- Sistema de Inventario de Desastres - DesInventar Project - Official Website. (s. f.). Recuperado el día 23 de julio de 2017, de <http://www.desinventar.org/es/database>
- Sorbino, G., & Nicotera, M. V. (2013). Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides. *Engineering Geology*, 165, 105-132. Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795212002931>
- Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD, & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2012). Guía metodológica para la elaboración de Planes Departamentales para la Gestión del Riesgo. PNUD. Recuperado el día 15 de julio de 2017 de la World Wide Web: <http://docplayer.es/12139107-Guia-metodologica-gestion-del-riesgo-para-la-elaboracion-de-plan-departamentales-para-la.html>
- Van Westen, C. J., Rengers, N., Terlien, M. T. J., & Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomenal through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau*, 86(2), 404-414. Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web: <http://link.springer.com/article/10.1007/s005310050149>
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2003). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters* (2nd ed.). New York: Routledge.

- Wyrski, K. (1975). El Niño-The dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 5(4), 572-584. Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0485\(1975\)005%3C0572:ENTDRO%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0485(1975)005%3C0572:ENTDRO%3E2.0.CO%3B2)
- Xue, J., & Gavin, K. (2008). Effect of rainfall intensity on infiltration into partly saturated slopes. *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(2), 199-209. Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10706-007-9157-0>
- Yilmaz, I. (2009). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat—Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(6), 1125-1138. Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300408002665>
- Zhang, L. L., Zhang, J., Zhang, L. M., & Tang, W. H. (2011). Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, 164(5), 299-316. Recuperado el día 28 de enero de 2016 de la World Wide Web: <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/geng.2011.164.5.299>