

Management of humanitarian aid to floods caused by the Phenomenon of EL NIÑO, through the optimal location of sensors in streams and rivers. Case of the overflow of the Piura river

Alex Victor Luyo Luque, Ing.¹, Fiorella Andrea Guerrero Ciprian, Ing.¹, and Jonatán Edward Rojas Polo, Mg.¹

¹ Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, alex.luyo@pucp.pe, fiorella.guerrero@pucp.edu.pe, jrojas@pucp.pe

Abstract– The year 2017 was a year in which El Niño phenomenon was the cause of a situation of great tension in departments such as Piura, Lambayeque, La Libertad, and Lima, leaving more than 1.7 million people affected [1]. This event represents the starting point for the execution of an adequate system of prevention and evacuation, which leads to a rehabilitation stage characterized by the minimization of the response time of humanitarian aid, and the reduction of the impact on the population.

This investigation proposes a methodology, focused on the case of the overflow of the Piura river, which seeks to achieve this minimization by locating sensors that measure in real time the flow and level of flow in streams and rivers. Its use represents the beginning of a prevention system to operate as part of a management system of risk alert for the population when the river reaches a certain level, and that added to the flow with which the currents come, generate an estimated time in which the overflow will occur. In this way, it will proceed to an early evacuation of all the inhabitants, and the proper management of humanitarian aid to the places of refuge. A model that combines linear programming with statistical and mathematical concepts is proposed, with the objective of implementing a warning risk management, and an adequate evacuation that generates a greater number of people who receive the necessary help in a shorter time, thus achieving that this research be a replicable proposal before future El Niño events in Peru.

Keywords– El Niño phenomenon, flood, disaster.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.125>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Gestión de la ayuda humanitaria ante inundaciones causadas por el Fenómeno del Niño, mediante la óptima localización de sensores en las quebradas y ríos - caso del desborde del río Piura

Alex Victor Luyo Luque, Ing.¹, Fiorella Andrea Guerrero Ciprian, Ing.¹, and Jonatán Edward Rojas Polo, Mg.¹

¹ Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, alex.luyo@pucp.pe, fiorella.guerrero@pucp.edu.pe, jrojas@pucp.pe

Resumen - El 2017, significó para el Perú, un año en el cual el Fenómeno del Niño fue la causa de una situación de gran tensión en departamentos como Piura, Lambayeque, La Libertad, y Lima, dejando a más de 1,7 millones de personas damnificadas [1].

Este suceso representa el punto de partida para la ejecución de un adecuado sistema de prevención y evacuación, que lleve a una etapa de rehabilitación caracterizada por la minimización del tiempo de respuesta de ayuda humanitaria y la reducción del impacto en la población. La presente investigación posee como caso de estudio el desborde del río Piura y propone una metodología que busca lograr esta minimización mediante la ubicación de sensores que miden a tiempo real el caudal en las quebradas y ríos. Su uso representa el inicio de un sistema de prevención al funcionar como parte de un sistema de gestión de alerta temprana para la población cuando el río llegue a un determinado nivel, generando una evacuación oportuna y la adecuada gestión de ayuda humanitaria hacia los lugares de refugio. Se propone un modelo que combine la programación lineal con conceptos estadísticos y matemáticos, con el objetivo de implementar una adecuada gestión de alerta de riesgo y que esta investigación sea una propuesta replicable ante futuros eventos de El Niño en el Perú.

Palabras claves: Fenómeno del Niño, inundación, desastre.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de la ayuda humanitaria es imprescindible dado un contexto de incertidumbre en las variables relacionadas al desastre natural; por ello, esta gestión debe estar enfocada en la minimización del tiempo de respuesta como resultado de una alerta de riesgo y plan de evacuación adecuados.

La presente investigación aborda como caso de estudio el desborde del río Piura, debido a que solo en este departamento hubo alrededor de 428 mil personas afectadas durante el 2017 [1], además es el departamento que presenta una mayor exposición por probabilidad de ocurrencia del Fenómeno El Niño.

A través del diseño y planificación adecuada de la localización de una red de sensores inalámbricos en el río Piura, estos detectarán el nivel de caudal en los límites críticos programados para calcular el tiempo estimado de inundación y maximizar la cobertura de comunicación de alerta a la población. Por ende,

dará paso a un plan de evacuación y, posteriormente, la logística de la ayuda humanitaria, relacionada a la localización de los almacenes para proveer kits de supervivencia, así como aquellos materiales de apoyo que van llegando desde otras partes del país hacia las zonas del desastre.

II. MARCO CONCEPTUAL

En el presente apartado se mencionan los conceptos claves que sirven de soporte a la investigación desarrollada.

A. Desastres

Un desastre se define como un evento adverso en un territorio determinado y cuya magnitud altera en gran medida la vida cotidiana de las personas, sus bienes, actividades y servicios, generando un retroceso en el desarrollo previamente planificado [2].

La atención de la pobreza, el crecimiento económico y el ambiente son elementos centrales en una gestión integral del riesgo por desastre. En primer lugar, mejorar las condiciones de vida en las comunidades pobres implica disminuir la presión sobre la sobrevivencia, permitiendo esfuerzos al tema de la prevención y preparación ante desastres. Por otro lado, mejorar la distribución de la riqueza, permite la inversión en obras de prevención y mitigación, tales como los sistemas de alerta temprana [3]. Y, finalmente, garantizar la preservación de los ecosistemas naturales, mantiene barreras que amortiguan el impacto de fenómenos naturales como los huracanes, las marejadas y los deslizamientos.

A.1. Gestión del riesgo del desastre

En los últimos 30 años, los desastres naturales han afectado a más de 2,5 millones de personas, ocasionando daños por USD 4 billones; las pérdidas mundiales se cuadruplicaron, aumentando de USD 50 mil millones al año en la década de 1980 a USD 200 mil millones en el último decenio [4]. De acuerdo a la ley N° 29664 que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), la gestión del riesgo de desastre orienta las políticas, estrategias y acciones en todos los niveles de gobierno y de la sociedad con la finalidad de proteger la vida de la población y el patrimonio de las personas y del Estado. El concepto tradicional de administración y manejo de los desastres se centraba en la

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.125>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

ocurrencia del desastre en sí, siguiendo una secuencia cíclica de las etapas de prevención, mitigación, preparación, alerta, respuesta, rehabilitación y reconstrucción, las cuales estaban organizadas según las fases de antes, durante y después. Sin embargo, el concepto actual de gestión del riesgo de desastre presenta una concepción más dinámica, integral y proactiva al incorporar todas las etapas del riesgo para prevenirlo, esto mediante la conglomeración de un conjunto de elementos, medidas y herramientas que intervienen sobre las condiciones de vulnerabilidad de uno o varios grupos sociales que pueden interactuar entre sí [2]. A continuación, se presentan los procesos que involucran la gestión del riesgo de desastres y contenidos dentro de la ley N° 29664:

- **Estimación del riesgo:** Identifica y valora el riesgo para tener una visión integral de la exposición que pudiera tener un determinado grupo social.
- **Prevención y reducción del riesgo:** Contempla las acciones que se orientan a evitar la generación de nuevos riesgos en la sociedad y a reducir las vulnerabilidades y riesgos existentes en el contexto de la gestión del desarrollo sostenible.
- **Preparación, respuesta y rehabilitación:** Son las acciones realizadas con el fin de procurar una óptima respuesta de la sociedad en caso de desastres, garantizando una adecuada y oportuna atención de las personas afectadas, así como la rehabilitación de los servicios básicos indispensables.
- **Reconstrucción:** Contempla las acciones que se realizan para establecer condiciones sostenibles de desarrollo en las áreas afectadas, reduciendo el riesgo anterior al desastre y asegurando la recuperación física, económica y social de las comunidades afectadas.

A.2. Resiliencia

Holling lo define como la habilidad de un conjunto de variables de absorber los cambios de estado y regresar al estado original [5]. Actualmente, la resiliencia es empleada en estudios orientados a los impactos de los desastres naturales. Ejemplo de ello son los estudios de investigación realizados por Lam y Kuipers [6] en el terremoto de Nepal 2015, donde en un ambiente de reconstrucción en Nuwakot y Dhading, distritos principalmente afectados, se identificaron como componentes críticos en la gestión del riesgo de desastre: la falta de involucramiento de los comuneros y la exclusión de los pobladores vulnerables. Bajo este contexto, la existencia o ausencia de los sistemas institucionales y socioeconómicos como parte de la descentralización de la estructura de gobierno y un medio facilitador de políticas flexibles e inclusivas, constituye un punto determinante en la capacidad de respuesta y mitigación de una comunidad frente a los desastres [7].

A.3. Fenómeno del Niño

A fines del siglo XIX, los pescadores del norte del Perú apreciaron que todos los años hacia fechas cercanas a Navidad, solía ocurrir un incremento de la temperatura del agua del mar,

la cual era observable a lo largo de la costa norte. En aquel siglo, se le atribuyó este calentamiento a la llegada de una corriente marina de aguas cálidas a la que llamaron la corriente de "El Niño" [8]. El fenómeno se inicia en el Océano Pacífico tropical, cerca de Australia e Indonesia, alterando con ello la presión atmosférica y cambios en la dirección y velocidad de los vientos, produciéndose lluvia en la región tropical. En condiciones normales, los vientos alisios (que soplan de este a oeste) apilan una gran cantidad de agua y calor en la parte occidental de este océano (observe la figura 1).

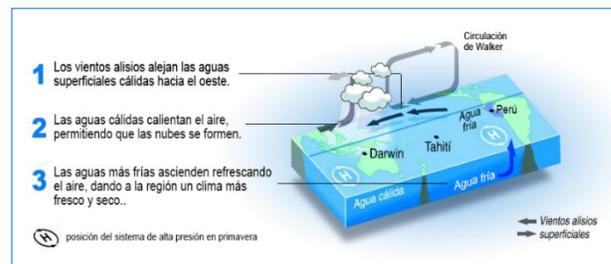


Fig. 1 - Un año normal sin Fenómeno del Niño
 Fuente: MINAM, SENHAMI, 2018

En cambio, durante el Fenómeno del Niño los vientos alisios se debilitan, la máxima temperatura marina se desplaza hacia la corriente de Perú que es relativamente fría y la mínima temperatura marina se desplaza hacia el Sureste Asiático (observe la figura 2). Esto provoca el aumento de la presión atmosférica en el sureste asiático y la disminución en América del Sur [9].

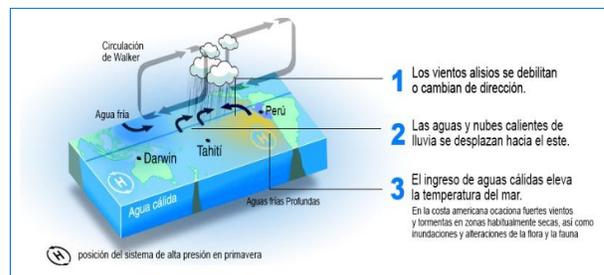


Fig. 2 - Un año con Fenómeno del Niño
 Fuente: MINAM, SENHAMI, 2018

En la figura 3, el primer recuadro a la izquierda muestra la temperatura de la superficie marina (SST) en el Pacífico del este durante marzo de 1981 a 2010. El segundo recuadro, al medio, muestra la temperatura de la superficie marina para marzo 2017. El tercer cuadro muestra la diferencia entre el primer y segundo recuadro durante marzo 2017. Durante todo marzo del 2017, las temperaturas promedio de la costa de departamentos como Piura fueron 3.5 °C más alto que el promedio normal [10].

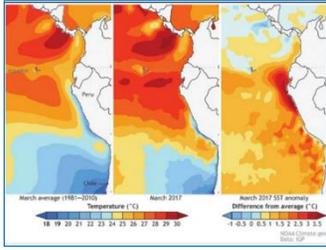


Fig. 3 - Calentamiento extremo de las aguas del Perú
Fuente: Instituto Geofísico del Perú

B. Cadena de suministro humanitaria

La cadena de suministro humanitaria involucra una red de entidades en el flujo de materiales, capital e información [11], incluye las actividades de preparación, planificación, adquisición, transporte, almacenamiento y despacho orientadas a las personas afectadas por los desastres que requieren una acción humanitaria [12]. Smilowitz y Dolinskaya [13] sostienen que el principal desafío de la gestión de la cadena de suministro humanitaria es el diseño de una red que establezca los flujos de donaciones provenientes de distintas fuentes en el tiempo apropiado y con la calidad adecuada para proporcionar los bienes o servicios de manera oportuna y eficiente a los necesitados. Según Cozzolino [14], la efectividad en la gestión integral de las operaciones logísticas dentro de la cadena de suministro constituye un factor determinante en la capacidad de respuesta ante una emergencia, observe la figura 4. Así también, Hermitte, Tatham y Bowles [15] señalan que las operaciones logísticas son desarrolladas bajo términos de demanda impredecible, magnitud de daño, recursos logísticos inadecuados, contextos políticos, condiciones de seguridad e insuficiencia de información.

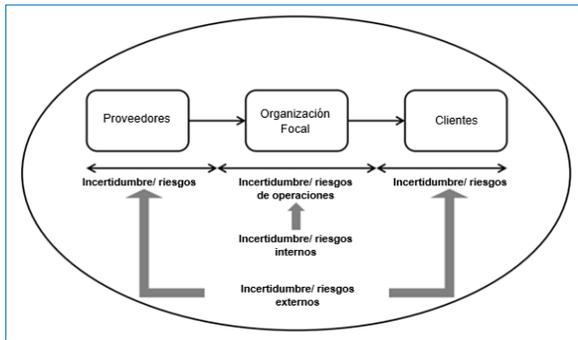


Fig. 4 - Riesgos e incertidumbres en la cadena de suministros
Fuente: Hermitte, Tatham, Brooks y Bowles, 2016 [15]

Debido a los riesgos e incertidumbre sujetos a la cadena de suministro, Balcik, Beamon, Krejci, Muramatsu y Ramirez [16] proponen un modelo unidireccional con enfoque genérico que puede adaptarse a múltiples escenarios de envío de ayuda humanitaria. La red logística se constituye principalmente en torno a los centros de distribución centrales y locales. Las actividades involucradas en la cadena se engloban en 3 etapas:

- *Adquisición de suministros*: Comprende las actividades para la obtención de suministros tanto a nivel local como global. Presenta como principales restricciones el tiempo de entrega y la disponibilidad de los suministros.
- *Pre-posicionamiento y almacenamiento*: Involucra el almacenamiento de los suministros adquiridos antes de un desastre en los centros de distribución intermedios centrales y locales.
- *Transporte*: Componente clave para el envío de ayuda humanitaria a los afectados. Presenta como principales restricciones el número limitado de vehículos, el estado de las carreteras y el volumen y tipo de bien a transportar.

Haavisto y Goentzel [17] proponen la medición del desempeño en el envío de suministro en acciones humanitarias en base a indicadores que contemplan la dimensión social, económica y ambiental. De esta manera, se busca evaluar las acciones realizadas en los desastres periódicamente para el diseño de estrategias que aseguren la efectividad en las acciones humanitarias [12]. En la Tabla I, se detallan las medidas de desempeño a considerar en el diseño de una cadena de suministro.

Tabla I
Medidas de desempeño de la cadena de suministro humanitaria [17]

Dimensión	Medida de la cadena de suministro
Social	Flexibilidad
	Costo Social
	Exactitud
	Equidad
	Innovación
Económico	Calidad de vida, bienestar
	Control financiero
	Flexibilidad
	Exactitud
Ambiental	Procesos involucrados
	Flexibilidad
	Eficiencia de recursos
	Utilización
	Procesos involucrados

C. Programación Lineal

Es la técnica más empleada de la investigación de operaciones para resolver modelos aplicados a los diversos sectores de la sociedad con funciones objetivos y restricciones de tipo lineal [18]. La programación lineal es aplicada al problema general de asignación óptima de recursos bajo un contexto de escasez de recursos y limitaciones de las actividades. Hillier y Lieberman, lo definen como la planificación adecuada de las actividades para obtener resultados óptimos [19].

Los problemas de programación lineal se formulan generalmente por medio de un modelo estándar, el cual cuenta con las siguientes partes: variables de decisión, función objetivo, restricciones funcionales, y rango de existencia.

D. Caudal

El caudal (Q) se define como el volumen de agua (V) que pasa por una sección en un determinado tiempo (t). Su medición se realiza de dos formas, por medio del método directo o indirecto. El primero emplea los métodos sección - velocidad y dilución con trazadores o molinete, mientras que el segundo emplea otras variables físicas distintas del caudal, como la velocidad o altura piezométrica.

Los sensores a analizar en el estudio de caso serán los correspondientes a una medición indirecta debido al tamaño del caudal a medir y la participación de variables físicas como la velocidad o altura piezométrica [20].

E. Sensor

El Instituto Nacional de Estándares Americanos (ANSI) define sensor como “aquel dispositivo que produce una señal de salida como resultado de la medición de un parámetro físico”. A partir de esta definición, se tiene una diversidad de enfoques de aplicación en función al parámetro de detección, el cual puede ser la velocidad, presión, caudal, temperatura, entre otros.

En este contexto, McGrath y Ni Scanail [21] establecen las principales características a tomar en consideración para un sensor, las cuales se describen en la Tabla II. Esta tabla también presenta el detalle de ciertas características de los sensores de nivel y ultrasonido, los cuales se emplearán en el análisis de escenarios para la medición del caudal del caso de estudio propuesto.

Tabla II
Características principales de un sensor

Característica	Descripción
Rango	Detalla el mínimo y máximo valor. Sensor de ultrasonido: 0.15 m a 6.45 m Sensor de nivel: [0.03 - 5] m
Función de transferencia	Describe la relación entre el parámetro de medida y la señal de salida.
Linealidad y no linealidad	Describe la diferencia entre la línea actual e ideal.
Sensibilidad	El cambio en la unidad de salida generado por una variación en el parámetro de entrada.
Efectos ambientales	Cambios ocasionados por condiciones externas. Los sensores propuestos operan en las siguientes temperaturas: Sensor de ultrasonido: [-40°C a +65°C] Sensor de nivel: [-25°C a +80°C] Su uso fuera de estas temperaturas no es recomendable.
Resolución	El menor cambio en el parámetro de entrada. Sensor de ultrasonido: 12 mm Sensor de nivel: 1 mm
Exactitud	Capacidad para obtener valores cercanos al valor real de medida.
Precisión	Dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas. Sensor de ultrasonido: 1% Sensor de nivel: 0.1%
Error	Diferencia entre el valor medido y el valor real.
Tiempo de respuesta	Tiempo que transcurre entre la detección de un parámetro y su cambio de estado de la señal de salida.

Fuente: McGrath y Ni Scanail, 2013 [21]

En el contexto de los desastres naturales, la importancia de contar con sistemas de respuesta y monitoreo de desastres

resulta crítico dado el incremento en los damnificados y en el número de fallecidos que experimentó el Perú como resultado del último fenómeno del Niño que aconteció el 15 de marzo del 2017. Es por ello que el establecimiento de factores para el diseño de una red óptima de sensores representa un punto clave para la implementación de un sistema de monitoreo y alerta temprana ante desastres naturales. Bajo esta premisa, Edam y Shimon [22] establecieron principios de selección bajo el enfoque operacional y económico para la determinación de la configuración óptima de una red de sensores en el sector industrial, la cual puede extender su alcance a los sistemas de gestión de alerta temprana dado la adaptación y flexibilidad presente en los sistemas integrados de sensores.

En la tabla III, se detalla los principios en mención.

Tabla III
Principios en la selección de sensores

Principio	Descripción
En relación al Usuario	Minimizar la distancia del tiempo de detección. Es preferible el empleo de sensores sin contacto con el objeto de detección.
En relación al ambiente de trabajo	Es preferible emplear sensores estáticos. Se debe minimizar el número de sensores en el diseño de red.
En relación a las características de los sensores	Optimizar el procedimiento y algoritmos de adquisición de data. Utilizar el sensor más simple que satisfaga los requerimientos planteados.

Fuente: Edam y Shimon, 2013 [22]

E.1. Red de sensores inalámbrico

El avance de la tecnología en los sistemas de comunicación y micro procesamiento en los sensores tradicionales ha permitido el desarrollo de una tecnología compacta multifuncional que engloba la idea de un conjunto de nodos sensoriales distribuidos de forma autónoma basado en el concepto de esfuerzo colaborativo, denominado red de sensores inalámbricos, observe figura 5, [23]. Es a partir de la idea de “esfuerzo colaborativo” que el despliegue de una red de sensores presenta ventajas significativas a comparación de los sensores tradicionales, dado que su capacidad de auto organización permite su aplicación en el monitoreo de terrenos inaccesibles.

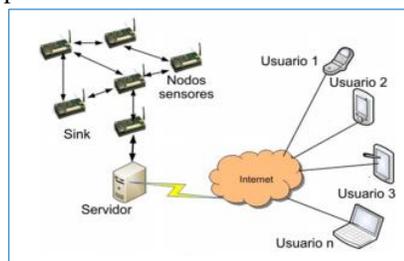


Fig. 5 - Arquitectura de implementación de una red inalámbrica de sensores
Fuente: Quiñones, Godoy y Sosa, 2013 [24]

Adicionalmente a este punto, Nayak y Stojmenovic [25], señalan su importancia en los campos de la Medicina, Agricultura y Medio Ambiente. En este último, resalta su aplicación en la detección de incendios y la importancia de contar con la información del evento y localización para llevar a cabo las medidas correctivas pertinentes. En la figura 6, se

visualiza la implementación de una red de sensores inalámbricos en la prevención y control de los incendios forestales.

E.2. Factores influyentes en el diseño de una red de sensores

Para un adecuado diseño de red de sensores, se debe tener en consideración los factores propuestos por Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam y Cayirci [23], quienes en base a un estudio de los componentes empleados en los diversos diseños de red de sensores establecen lineamientos que sirven de apoyo para el desarrollo de algoritmos y, al mismo tiempo, como punto de comparación entre distintos esquemas.



Fig. 6 - Implementación de una red inalámbrica de sensores en área forestal
Fuente: Lin, Liu, Wang y Liu, 2018 [26]

En la Tabla IV, se detallan los factores a considerar en el diseño de red de sensores [25]. Asimismo, se describen los principales factores a considerar para el análisis de escenarios con los sensores de nivel y ultrasonido.

Tabla IV
Principales factores en el diseño de una red de sensores

Factores	Descripción
Tolerancia a fallos	Capacidad de mantener las funciones de la red a pesar de tener fallas en el nodo sensor.
Escalabilidad	Capacidad de la red para adaptarse a un mayor número de nodos desplegados.
Costos de producción	Costos asociados con cada nodo sensor en el diseño de la red. Red de sensores ultrasonido: Costo de microprocesador, transmisor y sensor ultrasonido. Red de sensores de nivel: Costo de microprocesador, sirena, batería y sensor de nivel.
Restricciones de hardware	Los componentes que forman parte del sensor.
Topología de red de sensores	La capacidad de despliegue, mantenimiento y rediseño de los nodos de la red.
Ambiente	Condición bajo el cual operan los sensores. Red de sensores ultrasonido: [-40°C a +65°C] Red de sensores de nivel: [-25°C a +80°C]
Medios de transmisión	Frecuencia y banda de comunicación entre los nodos sensores de la red. Red de sensores ultrasonido: Zigbee. Red de sensores de nivel: GPRS (Servicio General de Paquetes vía Radio), ZigBee.
Consumo de energía	La vida útil de un nodo sensor depende del tiempo estimado de duración de la batería.

Fuente: Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam y Cayirci, 2002 [25]

III. SITUACIÓN ACTUAL

Como parte de la descripción de la problemática, durante la visita de las zonas afectadas, entre ellas Pedregal y Catacaos, se pudo observar la situación de varias familias que aún continúan esperando el apoyo de alguna entidad. En la figura 7, se puede observar en las marcas de las paredes, la altura a la cual llegó el agua durante el Fenómeno del Niño en marzo del 2017.

Piura fue uno de los departamentos más golpeados por el Niño Costero, ya que las lluvias inundaron la capital del departamento y causaron daños a la vida y salud, así como daños materiales que incluye daños a los medios de vida.



Fig. 7 – Marcas de agua sobre las paredes de las viviendas exterior/interior

Fueron afectados 65 distritos de las 8 provincias del departamento de Piura, dejando alrededor de 464 mil 974 personas damnificadas, así como 105 mil 369 viviendas afectadas. Las principales características del fenómeno del Niño 2017 fueron:

- La intensidad de las lluvias, ocasionaron la activación de quebradas secas, incrementando el caudal de los ríos ocasionando desbordes, tal es así que el río Piura el 27 de marzo 2017, tuvo su máxima avenida con un caudal de 3,800 m³/seg por encima de los datos históricos, afectando la totalidad del bajo Piura y dando lugar a la afectación de viviendas, áreas de cultivo, locales educativos, salud y afectación a las vías rurales y principales, además los medios de vida de las personas se vieron afectadas.
- Producto del desborde del río Piura el 27 de marzo aproximadamente a las 6:00 hrs. en lugares críticos de la Ciudad de Piura, Catacaos y Cucungará (Cura Mori), Pedregal Chico y Grande y al promediar las 10:00 hrs., el agua alcanzó su punto crítico, ingresando a las calles de Piura, Castilla, Cucungará, Catacaos y poblados Aledaños.

En el Perú en 43 ocasiones se han presentado el Fenómeno El Niño, de los cuales 7 han sido de carácter extraordinario. El primer mega Niño ocurrió en el Perú en el año 1578, siendo los departamentos de Lambayeque, La Libertad y Piura los más afectados. Existen investigaciones que también menciona la ocurrencia de 5 mega niños o niños extraordinarios que ocurrieron en el Perú antes de los ocurridos en los años 1982-83 y 1997-98, observe la Tabla V.

El Fenómeno del Niño de 1997-98 produjo inundaciones y deslizamientos de tierra que arrasaron con personas y ganado a su paso. Las aguas estancadas causaron la proliferación de

mosquitos, que a su vez desencadenaron un brote grave de enfermedades vectoriales. Además, la industria pesquera fue arruinada, ya que las aguas calientes de El Niño eliminaron, temporalmente, los ecosistemas tradicionales que sostienen a los peces de agua fría.

El evento de 1982-1983 fue similar o tal vez más grave que el de 1997-1998 en pérdidas de vidas humanas, personas afectadas y viviendas destruidas. No obstante, el evento de 1982-1983 fue menos anticipado y tuvo menor preparación y alertas.

Tabla V

Intensidad del Fenómeno El Niño en el Perú: 1578-2016

Débil	Moderado	Fuerte	Extraordinario
Total de casos			
17	14	5	7
1952	1932	1933	1578
1953	1939	1941	1720
1958	1943	1957	1878
1969	1951	1965	1891
1976	1994-1995	1972	1925
1977	1969-1969		1982-1982
1993	1986-1987		1997-1998
1994	1991-1992		
2002	1994-1995		
2003	2002-2003		
2004	2006-2007		
2008	2009-2010		
2009	2011		
2013	2012		
2014			
2015			
2016			

Fuente: INDECI, 2017 [27]

Con el recuerdo de El Niño 1982-1983 y 1997-1998 (observe la Tabla VI), en julio de 2012, el gobierno peruano declaró estado de emergencia por 60 días en respuesta al pronóstico de un fuerte fenómeno para aquella temporada. Cuando El Niño 2015-2016 no ocurrió como se esperaba, las medidas de seguridad cesaron, no obstante, El Niño Costero del 2017 sorprendió al Perú [10].

Tabla VI

Daños por sector y estimados de riesgo para el fenómeno el niño 1982-1983 y 1997-1998 y el Niño Costero 2017

	1982-1983 EL Niño	1997-1998 EL Niño	2017 EL Niño Costero
Población	512 muertos, 1.27 millones de afectados	366 muertos, 0.53 millones de afectados	114 muertos, 1.08 millones de afectados
Infraestructura de Transporte	2600 km de vías, 51 puentes	3136 km de vías, 370 puentes	4931 km de vías, 881 puentes (489 totalmente destruidos)
Vivienda	98 000 casas destruidas; 111 000 dañadas	48 563 casas destruidas; 108 000 dañadas	38 728 casas destruidas; 27 635 dañadas
Educación	875 escuelas dañadas	2873 escuelas dañadas	2150 escuelas dañadas
Salud	260 puestos de salud dañados	580 puestos de salud dañados	726 puestos de salud dañados
Pérdidas totales en dólares americanos	3.28 millones (en USD de 1998)	3.5 millones (en USD de 1998)	3.9 millones (en USD de 2017)

Fuente: INDECI, 2017 [27]

Durante enero a marzo del 1983, las lluvias se concentraron en el extremo norte del Perú (Tumbes, zonas medias y baja de la región de Piura, gran parte de Lambayeque, costa norte de La Libertad y Cajamarca en la zona colindante con esta) con excesos que superaron los 200% sobre su valor normal (observe la figura 8). De igual manera, en gran parte de la zona occidental de Ancash, y de manera focalizada en los departamentos de Lima y Tacna.

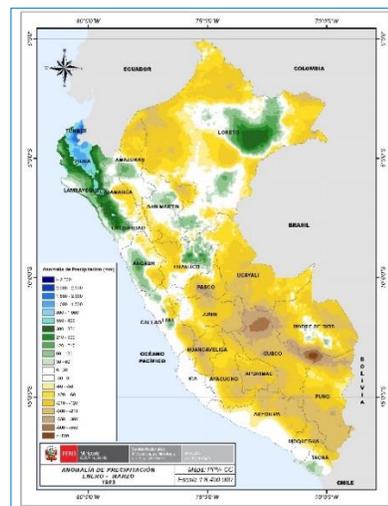


Fig. 8 - Anomalías de precipitación durante El Niño (%) enero - marzo 1983
Fuente: SENAMHI, 2017 [28]

Durante el trimestre enero a marzo de 1998 (observe la figura 9), en la costa norte las lluvias se concentraron en los departamentos de Tumbes, Piura y Lambayeque, las mismas que presentaron superávit de lluvias por encima a 200%.

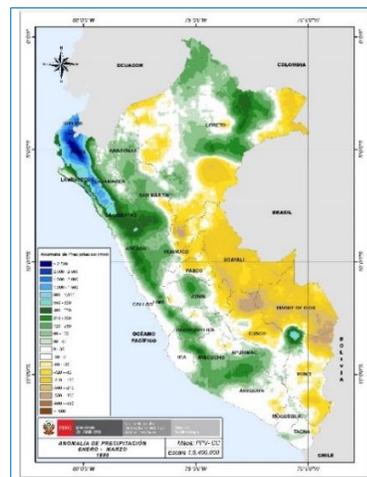


Fig. 9 - Anomalías de precipitación durante El Niño (%) enero - marzo 1998
Fuente: SENAMHI, 2017 [28]

Durante el trimestre enero-marzo 2017 (observe la figura 10), se registraron lluvias frecuentes e intensas en la vertiente occidental de los Andes, principalmente en el sector norte y central, y concentradas especialmente entre febrero y marzo.

Ciudades como Piura, Chiclayo, Trujillo y Huarmey soportaron lluvias intensas que superaron records históricos observados solamente en eventos El Niño extraordinarios. Durante el periodo crítico de lluvias intensas, se presentaron lluvias entre “fuerte” a “extremadamente fuertes”, principalmente en las zonas bajas y medias de Tumbes, Piura y Lambayeque. Anomalías de lluvias que superaron el 200% se presentaron en los departamentos de Piura, Lambayeque, La Libertad, Ancash y Lima. Asimismo, de manera localizada en Cajamarca, Ica, Puno, Ayacucho, Arequipa y Moquegua.

Los daños surgidos en los tres eventos son equiparables. Esto sugiere que los impactos de las inundaciones de 2017 fueron acentuados por las acciones humanas.

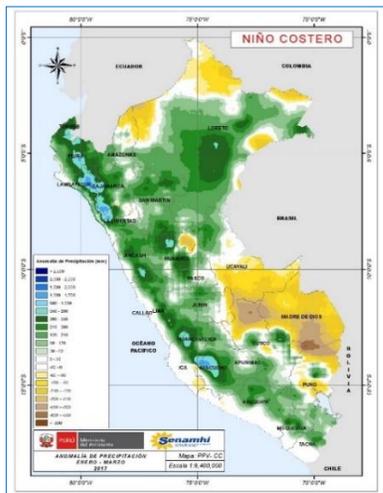


Fig. 10 - Anomalías de precipitación durante El Niño (%) enero - marzo 2017
Fuente: SENAMHI, 2017 [28]

La destrucción no se limita a las viviendas, a la infraestructura y a las vidas, el fenómeno del Niño destruye los medios de sustento de las personas. Las inundaciones y deslizamientos destruyen las tierras productivas ya que la agricultura es altamente dependiente del clima y susceptible a varias amenazas (ver Tablas VII, VIII y IX).

Tabla VII

Daños a la vida y salud, por efectos del Niño Costero 2017, Procesamiento al 95.5%

Departamento	Daños a la vida y salud (Personas)				
	Dañificadas	Afectadas	Fallecidas	Heridas	Desaparecidas
Total Niño Costero Perú	285 453	1 454.051	138	459	18
Ancash	34 313	116 848	27	126	1
Arequipa	2 110	48 914	17	40	5
Ayacucho	1 264	6 890	9	6	
Cajamarca	1 655	11 468	8	6	2
Huancavelica	6 227	30 770	6	4	
Ica	4 611	106 703	3	60	
Junín	1 153	897	24	25	
La Libertad	79 623	386 521	9	70	4
Lambayeque	44 619	138 336	9	5	2
Lima	18 775	40 176	16	76	1
Loreto	67	117 506	1	1	
Piura	89 709	375 265	18	40	3
Tumbes	1 327	73 757			

Fuente: SINPAD, COEN, INDECI, 2017 [27]

Tabla VIII

Daños en viviendas y locales públicos, por efectos del Niño Costero 2017, Procesamiento al 95.5%

DPTO	Viviendas destruidas	Viviendas afectadas	I.E.E. Destruídos e inhabitables	I.E.E. Afectadas	EE.SS. Destruídos e inhabitables	EE.SS. Afectados
Total Perú Niño Costero	63 802	350 181	318	2 870	62	934
Ancash	5 186	27 210	67	298	17	93
Arequipa	451	11 687	9	168	0	52
Ayacucho	254	1 734	16	98	1	24
Cajamarca	427	2 416	8	94	2	19
Huancavelica	1 242	5 868	15	149	0	100
Ica	1 149	23 783	3	78	1	35
Junín	294	256	2	5	1	1
La Libertad	19 151	104 174	47	457	3	167
Lambayeque	10 051	30 285	33	275	11	85
Lima	3 850	9 934	60	263	23	75
Loreto	22	28 487	0	61	0	6
Piura	21 412	83 957	58	831	3	237
Tumbes	313	20 390	0	93	0	40

Fuente: SINPAD, COEN, INDECI, 2017 [27]

Tabla IX

Daños en Transportes y Comunicaciones por Niño Costero 2017, Procesamiento al 95.5%

DPTO	Caminos Rurales destruidos (Km)	Caminos Rurales afectados (Km)	Carreteras Destruídas (Km)	Carreteras Afectadas (Km)	Puentes Destruídos
Total Perú	12 832	221 219	4 778	13 311	449
Ancash	235	1 311	462	1 321	116
Arequipa	185	532	738	514	18
Ayacucho	534	3 931	210	869	14
Cajamarca	102	198	103	517	23
Huancavelica	33	8 461	160	916	21
Ica	132	89	112	529	5
Junín	7	18	5	210	
La Libertad	369	22 338	1 038	701	38
Lambayeque	346	705	98	122	63
Lima	3 742	707	1 498	6 201	124
Loreto		68	0	13	
Piura	7 099	182 691	345	1 302	27
Tumbes	49	169	10	96	

Fuente: SINPAD, COEN, INDECI, 2017 [27]

IV. MODELO PROPUESTO

En este acápite, se desarrollarán 3 escenarios en función a los tipos de sensores seleccionados en la sección anterior. Posteriormente, cada posible escenario será evaluado mediante el algoritmo propuesto de programación lineal entera a fin de determinar el arreglo adecuado y los tipos de sensores a emplear en la red.

A. Análisis de escenarios

A.1. Escenario 1:

Debido al incremento sustancial en las lluvias y el caudal del río Piura en las últimas manifestaciones del fenómeno de El Niño del 2017, alcanzando valores cercanos a 3000 m³/s, superiores a los promedios históricos, ver figura 11 (a) [29]. Se propone el empleo de sensores de ultrasonido en los nodos sensores de la red para la medición y monitoreo del caudal, ver figuras 11(a) y 11 (b). Adicional a ello, se plantea equipar los

nodos sensores con paneles solares y con sistema de comunicación GSM (Sistema Global de comunicaciones Móviles). De esta manera, contar con sensores autónomos con la capacidad de establecer un sistema de comunicación vía mensaje de texto con los pobladores potencialmente afectados.

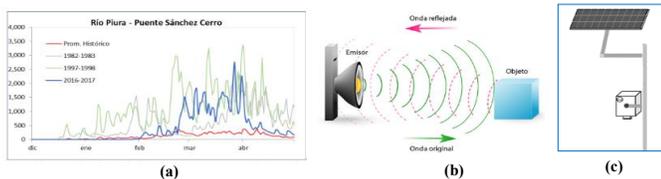


Fig. 11 – (a) Evolutivo de caudal durante el fenómeno El Niño. (b) Funcionamiento del sensor de ultrasonido. (c) Prototipo de escenario 1
Fuente: (a) Informe Técnico Extraordinario El Niño Costero 2017 (ANA) [30]. (b) Zona Maker [31]

A.2. Escenario 2:

El objetivo de la segunda propuesta es recolectar, archivar, enviar y transmitir los datos obtenidos por boyas que contienen sensores de nivel, ubicados estratégicamente a lo largo del ancho del cauce donde se sitúan los puntos críticos del río Piura. El funcionamiento de las boyas consiste en un sistema de alerta de colores detallado en la Tabla X, los cuales hacen referencia al nivel de riesgo al que está expuesta la población según la crecida de nivel del río.

Tabla X
Colores de alerta según estimación de riesgo

Nivel	Color
Muy alto	Rojo
Alto	Naranja
Medio	Amarillo
Bajo	Verde

Fuente: INDECI (2015) [32]

En la tabla XI se presentan las acciones a tomar de acuerdo a los colores de alerta emitidos por las luces de las sirenas que componen el escenario 2 [32].

Tabla XI
Condiciones de alerta y acciones

Nivel	Condición de alerta	Acción
Situación normal →	Condiciones normales del nivel de río (Ejemplo: promedio acumulado para el periodo 150 mm).	No se realiza ninguna acción puesto que el nivel de peligro es bajo.
Condiciones de aviso →	Condición de alerta, se debe continuar el monitoreo con mayor frecuencia ante una probabilidad de alcanzar el umbral (Ejemplo: promedio acumulado se encuentra en 160 mm, siendo el umbral 170 mm).	Se debe dar aviso a la población ubicada en zonas de alto y muy alto riesgo para que tomen las precauciones ante una posible evacuación. Los equipos de primera respuesta se preparan.
Condiciones críticas →	Nivel de río alcanza el umbral establecido para generar desborde (Ejemplo: promedio acumulado sobrepasa los 175 mm).	Las autoridades deben implementar acciones para la evacuación. La población ubicada aguas abajo o en zonas de alto y muy alto riesgo, deberá realizar la evacuación. Se debe poner en práctica el plan de contingencia.
Impacto o desastre →	Nivel de río sobrepasa por mucho el umbral establecido (Ejemplo: promedio acumulado sobrepasa los 185 mm en la primera hora o 190 mm en la segunda hora).	La población ubicada aguas abajo ya ha realizado la evacuación. Se realiza el plan de operaciones de emergencia.

Fuente: INDECI (2015) [32]

A.3. Escenario 3:

Se propone el empleo de una red heterogénea de nodos tomando como base los tipos de sensores descritos en los escenarios

previos con la finalidad de contar con una red adaptable, flexible y confiable. A partir de las características de los sensores de nivel y de ultrasonido sumado al empleo de clusters o agrupamientos se busca una transmisión de datos más eficiente. De modo que la información recolectada es consolidada en los nodos principales y enviada al centro de control o sumidero, ver figura 12.

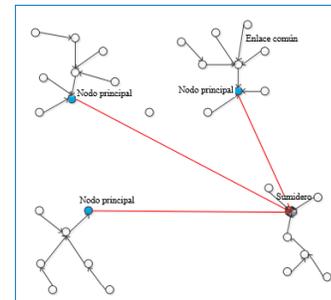


Fig. 12 - Red de sensores heterogénea

Fuente: Li, C., Bai, J., Gu, J., Yan, X., & Luo, Y. [33]

Es necesario precisar que se mantendrá los umbrales de alerta de riesgo respectivos en cada sensor con el objeto de fortalecer la capacidad de respuesta de la población ante la ocurrencia de inundaciones. Una de las principales ventajas son los canales de difusión de alerta de riesgo, dado que al contar con dos medios de comunicación como los mensajes de textos y las sirenas se dispone de recursos efectivos para comunicar de manera clara, confiable y coherente el peligro en todos los grupos dentro de la comunidad vulnerable. De esta manera, reducir el impacto en la población en términos de daños materiales y pérdida de vidas humanas.

B. Modelo matemático propuesto

La metodología empleada para el problema en cuestión se estructuró de acuerdo a los siguientes puntos:

B.1. Identificación de los puntos críticos

En base a los estudios realizados por COER Piura, instrumento del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), se han identificado 71 puntos críticos como resultado de la evaluación sectorial in situ de los factores de vulnerabilidad existentes en las comunidades susceptibles al desborde del río Piura dado su grado de exposición, fragilidad, resiliencia, antecedentes y nivel de peligro inminente. A partir de los puntos identificados, se ha determinado una matriz de distancias mediante la herramienta QGIS, observe figura 14.

B.2. Simplificación de la red de sensores

Se realiza una matriz simplificada donde se detallan las distancias mínimas entre los puntos críticos. A partir de su cálculo, se plantea el empleo de dos tipos de antenas dado el rango de cobertura de los tipos de sensores que componen cada una de las propuestas mencionadas en el acápite anterior.

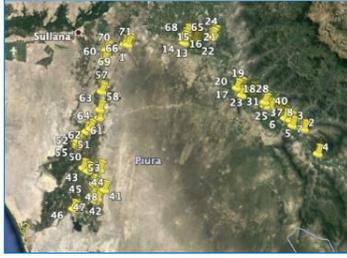


Fig. 13 - Puntos críticos

En base a las características de los sensores empleados en cada propuesta y las consideraciones previamente mencionadas, se debe considerar las siguientes restricciones en el diseño de la red:

- El área de cobertura determinado por los puntos críticos identificados en la figura 13, representa la región crítica sobre la cual actuar para mitigar los riesgos.
- La difusión de los mensajes emitidos por los nodos sensores no tiene restricción debido a la cobertura telefónica existente en el área a evaluar.

Adicionalmente, se considera el siguiente supuesto:

- La transmisión de información entre sensores y el centro de control, se lleva a cabo de manera indirecta mediante el nodo sensor más cercano al centro de control.

En función a los tipos de antena de cobertura, se determinó dos matrices MA y MC, arreglos de orden 71×71 , con valores 1 o 0 según la distancia mínima a cubrir en cada punto crítico a evaluar.

Se cumple:

- Cada valor MA_{ij} toma el valor de 1 si la distancia entre nodos i y j no supera los 1600 m; caso contrario, toma el valor de 0.
- Cada valor MC_{ij} toma el valor de 1 si la distancia entre nodos i y j no supera los 24 km; caso contrario, toma el valor de 0.

C. Modelo de Optimización

Se desarrolla un modelo matemático en AMPL usando CPLEX. Se tiene como función objetivo la minimización de los costos de instalación e implementación de los sensores en los puntos críticos (Z).

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N C_{SA} N_{SAi} + \sum_{i=1}^N C_{SB} N_{SBI}$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^N MA_{ij} N_{SAj} \geq 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N MC_{ij} N_{SBj} \geq 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$N_{SAi} + N_{SBj} \leq 1 \quad \forall i, j \in N, i \neq j \quad (4)$$

$$N_{SAi}, N_{SBI}, MA_{ij}, MC_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \in N \quad (5)$$

Las ecuaciones (2) y (3) delimitan la cantidad mínima de sensores tipo a o b en cada uno de los puntos críticos. El valor esperado es al menos 1 lo que implica la existencia de por lo menos un nodo sensor para establecer la transmisión de datos. La ecuación (4) asegura la existencia o no de un tipo de sensor con antena a o b evaluado en cada punto crítico. La expresión (5) representa el rango de existencia de las variables a emplear en el modelo. Donde las variables del modelo son:

C_{SA} = Costo de un sensor con antena tipo a

C_{SB} = Costo de un sensor con antena tipo b

N = Número total de puntos críticos

N_{SAi} = Variable de decisión binaria que determina la existencia de un nodo sensor con antena tipo a en el nodo i

N_{SBI} = Variable de decisión binaria que determina la existencia de un nodo sensor con antena tipo b en el nodo i

MA_{ij} = Matriz de valores 1 y 0 que determina la existencia de las variables N_{SAi}

MC_{ij} = Matriz de valores 1 y 0 que determina la existencia de las variables N_{SBI}

A partir de las características técnicas, el protocolo de comunicación y la localización óptima de los sensores, se infiere un tiempo estimado de transmisión de alerta mediante la siguiente expresión, la cual sirve de base para una adecuada gestión del tiempo de respuesta ante la ocurrencia del desastre.

$$TT = \sum_{i=1}^N \left(\frac{N_{SAi} * CD_{SAi}}{VT_{SAi}} + \frac{N_{SBI} * CD_{SBI}}{VT_{SBI}} \right)$$

Donde:

TT = Tiempo de transmisión

N = Número de nodos

N_{SAi} = Variable de decisión binaria que determina la existencia de un nodo sensor con antena tipo a en el nodo i

CD_{SAi} = Cantidad de datos a transmitir en bits del nodo sensor con antena tipo a en el nodo i

VT_{SAi} = Velocidad de transmisión en bits/s del nodo sensor con antena tipo a en el nodo i

N_{SBI} = Variable de decisión binaria que determina la existencia de un nodo sensor con antena tipo b en el nodo i

CD_{SBI} = Cantidad de datos a transmitir en bits del nodo sensor con antena tipo b en el nodo i

VT_{SBI} = Velocidad de transmisión en bits/s del nodo sensor con antena tipo b en el nodo i

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En base al modelo matemático propuesto y su adaptación para llevar a cabo la evaluación de los tres escenarios descritos en la presente investigación, se obtuvo como resultado los puntos de localización de los sensores correspondientes a cada alternativa de solución propuesta, observe la figura 14.

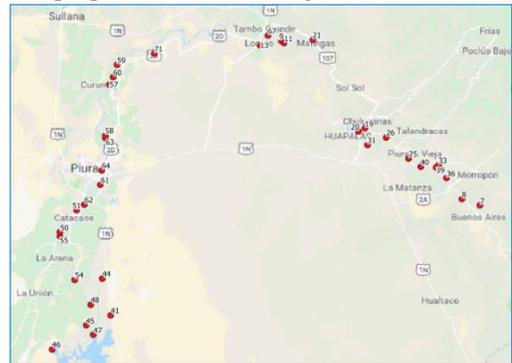


Fig. 14 – Puntos de localización óptima de los sensores

La propuesta para la implementación de la presente investigación se llevó a cabo según la guía técnica de implementación de Alerta Temprana Comunitaria en el marco de la Ley del SINAGERD, la cual define el Sistema de Alerta

Temprana (SAT) como una estructura operativa caracterizada por la participación continua y activa de la población en la etapa de preparación en la gestión de riesgos de desastres. Es a partir de esta definición que se pretende integrar una red de sensores inalámbricos al SAT sumado a la cooperación conjunta de la población con la finalidad de contar con un sistema capaz de evaluar y analizar los peligros de manera oportuna y organizada.

El Sistema de Alerta Temprana propuesto consta de 5 partes.

A.1. Identificación de riesgos

Se llevará a cabo en función al grado de peligro y vulnerabilidad, observe Tabla XII, para lo cual se debe recopilar información social, física, económica y ambiental en la elaboración de mapas de peligros de la comunidad.

Tabla XII
Identificación de riesgos según la vulnerabilidad y el peligro

Peligro Muy Alto	Riesgo Alto	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto	Riesgo Muy Alto
Peligro Alto	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto
Peligro Medio	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Alto
Peligro Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Alto
P/V	Vulnerabilidad baja	Vulnerabilidad Media	Vulnerabilidad Alta	Vulnerabilidad Muy Alta

A.2. Monitoreo y Seguimiento

Contar con un procedimiento adecuado en el monitoreo y seguimiento de los parámetros de Control, y dar alerta ante eventos presentes. Adicional a ello, realizar acciones preventivas mediante la elaboración de pronósticos de los desastres.

A.3. Formación de equipos de trabajo

Cada comunidad vulnerable formará equipos de trabajos conformados por personas que cuentan con experiencia previa en voluntariados, autoridades locales y líderes de las comunidades; de modo que, el íntegro del equipo de trabajo este apto para brindar asesoramiento claro, conciso y coherente a todos los miembros de la comunidad.

A.4. Difusión y comunicación de alerta

La difusión de la alerta mediante la propuesta seleccionada se ejecuta de manera automática en el nodo sensor. Cabe precisar que es necesario contar con instrumentos de difusión de fácil portabilidad como el silbato y el megáfono a fin de mantener una comunicación activa.

A.5. Simulacro

El objetivo de este punto es evaluar las acciones de evacuación ante una situación de emergencia con el propósito de identificar puntos de mejoras y proponer planes de acción que contribuyan de manera eficaz a la capacidad de respuesta de la comunidad.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El arreglo de los sensores del escenario 1 satisface con las restricciones del diseño de la red y genera un costo total de \$ 12 058.65, menor con respecto a la simulación del escenario 2 y 3, ver Tabla XIII.

Tabla XIII
Comparación de costos y número de iteraciones según escenario

Resultado de Optimización		
Escenarios	Número de Iteraciones	Costo Total (\$)
Escenario 1	57	12 058.65
Escenario 2	57	14 774.65
Escenario 3	57	12 239.35

La óptima localización de la red de sensores está basada en la determinación de puntos críticos como resultado de una evaluación de los factores de vulnerabilidad y resiliencia desarrollados por COER Piura en las comunidades afectadas por el fenómeno El Niño. Este enfoque es relevante en el desarrollo del estudio dado que conlleva a obtener beneficios económicos, sociales y ambientales a partir de su aplicación.

Cabe mencionar que el modelo matemático no contempla como variable de salida el tiempo de respuesta ante la ocurrencia del desastre. No obstante, marca un punto de partida para el desarrollo de modelos predictivos y prescriptivos.

Se recomienda seguir profundizando con la presente investigación, expandiendo su aplicación en distintos contextos, tomando en cuenta las recomendaciones en mención orientadas a la adecuada gestión de riesgos del Sistema de Alerta Temprana.

REFERENCIAS

- [1] Cáritas del Perú (2017). Emergencia por Huacos e inundaciones en Perú. Consulta: 20 de setiembre de 2018.
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2011). Manual de gestión de riesgo de desastre para comunicadores sociales. Consulta: 27 de abril de 2018. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000219184>
- [3] Barrantes, Gustavo (2011). Desastres, desarrollo y sostenibilidad. Universidad Nacional Heredia, Costa Rica.
- [4] Banco Mundial (2016). Gestión del riego de desastre. Consulta: 28 de abril de 2018. www.bancomundial.org/es/topic/disasterriskmanagement/overview
- [5] Holling, C. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 4, 1973, pp.1-23.
- [6] Lam, L. M., & Kuipers, R. (2018). Resilience and Disaster Governance: some insights from the 2015 Nepal Earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.
- [7] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Análisis de Sistemas de Gestión del Riesgo de Desastres: Una Guía. Roma: FAO. Consulta: 30 de abril de 2018. www.fao.org/3/a-i0304s.pdf
- [8] Ministerio del Ambiente (2014). El fenómeno El Niño en Perú. SENHAMI, Lima. Consulta: 29 de abril de 2018. www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/07/Dossier-El-Ni%C3%B1o-Final_web.pdf
- [9] Ministerio de Educación (2016). Memorándum 005-2016. Consulta: 29 de abril de 2018. <http://datos.minedu.gob.pe/sites/default/files/160303%20Memo%20005%20Chosica.pdf>
- [10] Soluciones prácticas, ISET, ZURICH (2017). El Niño Costero: Las inundaciones de 2017 en el Perú. Consulta: 27 de abril de 2018. <http://repo.floodalliance.net/jspui/bitstream/44111/2594/4/Libro-PERC-nino-costero.pdf>
- [11] Harland, C. (1996). Supply chain management: Relationships, chains and networks. *British Journal of Management*, 7(S1), S63-S80
- [12] Argollo da Costa, S., Campos, V., Bandeira, R. (2012). Supply Chains in Humanitarian Operations: Cases and Analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 54. 598–607. [10.1016/j.sbspro.2012.09.777](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.777).
- [13] Smilowitz, K.; Dolinskaya, I. (2011) Decision-making tools for distribution networks in disaster relief. Center for the Commercialization of Innovative Transportation Technologies – Northwestern University.
- [14] Cozzolino, A. (2012). Humanitarian Logistics: Cross-Sector Cooperation in Disaster Relief Management. Roma: SpringerBriefs in Business.
- [15] L'Hermitte, C., Tatham, P.H. and Bowles, M. (2014), "Classifying logistics-relevant disasters: conceptual model and empirical illustration", *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, Vol. 4, No. 2, pp. 155- 78.
- [16] Balcik, B., Beamon, B., Krejci, C., Muramatsu, K. & Ramirez, M. (2010). "Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities". *Int. J. Production Economics* 126, 22-34
- [17] Haavisto, I., & Goentzel, J. (2015). Measuring humanitarian supply chain performance in a multi-goal context. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 5(3), 300–324.
- [18] Taha, H. (2017). *Investigación de Operaciones*. Pearson Educated.
- [19] Hillier, F, & Libierman, G. (2016). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México: McGraw-Hill
- [20] Guía de aforos en canales abiertos y estimación de tasas de infiltración. (2013). En McPhee T. (Comp.), CI5101: Hidrología. Universidad de Chile.
- [21] McGrath M.J., Scanaill C.N. (2013) Sensing and Sensor Fundamentals. In: *Sensor Technologies*. Apress, Berkeley, CA Edan, Y. & Nof, S.Y. IIE Transactions (2000) 32: 195
- [22] Edan, Y., Shimon Y. (2000) Sensor economy principles and selection procedures. *Springer* 32: 195.
- [23] Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422.
- [24] Adriana P. Quiñones, Diego A. Godoy, Eduardo O. Sosa (2013). *Redes Inalámbricas de Sensores: Una experiencia en la Industria del Té*. Congreso Argentino de Agro Informática (CAI)
- [25] Nayak, A. y Stojmenovic, I. (2010) *Wireless Sensor and Actuator Networks: Algorithms and Protocols for Scalable Coordination and Data Communication*. Wiley.
- [26] Lin, H., Liu, X., Wang, X., & Liu, Y. (2018). A fuzzy inference and big data analysis algorithm for the prediction of forest fire based on rechargeable wireless sensor networks. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 18, 101–111.
- [27] INDECI (2017). Boletín estadístico virtual de la gestión reactiva. Consulta: 26 de abril de 2018. <https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201708091706381.pdf>
- [28] Senamhi (2018). Herramientas – Escenario de lluvias: Histórico de lluvias. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=escenarios-lluvia>
- [29] Estudio Nacional del Fenómeno “El Niño” (2017). Informe Técnico Extraordinario N°001-2017/ENFEN EL NIÑO COSTERO 2017. http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/imarpe_infico_informe_tecnico_extraordinario_001_2017.pdf
- [30] CENEPRED (2018). Escenarios de riesgos por lluvias intensas.
- [31] ZonaMaker (2018). Sensor de Ultrasonido HC-SR04. Consulta: 20 de enero de 2019. www.zonamaker.com/arduino/modulos-sensores-y-shields/ultrasonido-hc-sr04
- [32] INDECI (2015). Guía técnica para la implementación del sistema de alerta temprana comunitario.
- [33] Li, C., Bai, J., Gu, J., Yan, X., & Luo, Y. (2018). Clustering routing based on mixed integer programming for heterogeneous wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 72, 81–90.