

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“MODELO CONCEPTUAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA: CASO APLICADO A
EVENTOS EXTREMOS FRÍOS”**

Presentada por:

Elizabeth Silvestre Espinoza

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERA METEORÓLOGA**

Lima – Perú

2020

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“MODELO CONCEPTUAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE
SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA: CASO APLICADO A
EVENTOS EXTREMOS FRÍOS”**

Presentada por:

ELIZABETH SILVESTRE ESPINOZA

Tesis para optar el título de:

Ingeniera Meteoróloga

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Mg.Sc. Victoria Doris Calle Montes
PRESIDENTE

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
MIEMBRO

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar
MIEMBRO

Mestre. Jerónimo García Villanueva
ASESOR

DEDICATORIA

Esta Tesis va dedicada a mi familia, Felipe, mi esposo, Leonardo, Gustavo y Hana Luciana, mis hijos, por su cariño, paciencia y motivación, alerta, seguimiento y monitoreo.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios, por estar y existir.

En segundo lugar, A mis padres, ya con Dios, por sus eternas lecciones y enseñanzas, que son inmortales y permanecen.

Indicar en tercer lugar a mi familia, hermanos, sobrinos, cuñados (as), suegro, suegra, por estar siempre presentes.

Al Profesor Jerónimo García Villanueva, por su dedicación y comprensión durante el desarrollo de la Tesis.

A FONDECYT, que subvencionó el Proyecto Sistema de Alerta Temprana para Heladas: Monitoreo-Pronóstico-Tecnología, en el marco del cual se desarrolló la presente tesis.

A Wilmer Pulache Vilchez, Alan Aguilar Sologuren, Felipe Manuel Amaya Infante, Jorge Luis Rivera Ñavincopa, Victor Ñavincopa, por su participación directa e indirecta en el proyecto Sistema de Alerta Temprana para Heladas-Monitoreo-Pronóstico-Tecnología, subvencionada por FONDECYT, que dio origen a esta tesis.

A todos los amigos que directa e indirectamente apoyaron para el desarrollo de ésta Tesis.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCION.....	1
II.	REVISION DE LITERTURA.....	5
	2.1. Ciencia y Tecnología sobre gestión de Riesgos.....	5
	2.2. Marco Normativo sobre Gestión de Riesgos.....	9
	2.3. Modelamiento Numérico relacionado con la Gestión de Riesgos.....	13
	2.3.1. Las ecuaciones gobernantes del Modelamiento Numérico Atmosférico.	14
	2.3.2. El Sistema de Modelamiento Numérico Atmosférico.....	16
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
	3.1. Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana - McSAT.....	17
	3.1.1. Componentes del Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT	21
	3.1.1.1. Componente Científico.....	21
	3.1.1.2. Componente Tecnológico.....	22
	3.1.1.3. Componente Social.....	22
	3.1.2. Características del Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana- McSAT.....	23
	3.1.2.1. Específicos.....	23
	3.1.2.2. Únicos.....	23
	3.1.2.3. Tiempo Real.....	23
	3.1.2.4. Monitoreo.....	24
	3.2. Aplicación del Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana para eventos extremos fríos en el Perú.....	25
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	26
	4.1. Resultado 1: El Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana –McSAT	26
	4.1.1. Para la Determinación del Riesgo.....	27
	4.1.2. Para la Selección de Sensores.....	29
	4.1.3. Para la Emisión de la Alerta.....	31

4.2. Resultado 2: Aplicación del Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta temprana –McSAT para el caso de eventos extremos fríos	32
4.2.1. Respecto a la Determinación del riesgo.....	32
4.2.2. Respecto a la selección de Sensores.....	40
4.2.3. Respecto a la Emisión de la Alerta.....	43
4.2.4. Respecto a la instalación del Sistema de Alerta Temprana para eventos Extremos fríos aplicando el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT.....	46
V. CONCLUSIONES.....	47
VI. RECOMENDACIONES.....	49
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	50
VIII. ANEXOS.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Preguntas claves que relacionan el componente científico y el social.....	33
Tabla 4.2: Porcentaje de acierto de los pronósticos por meses	39
Tabla 4.3: Indicadores para la implementación del componente tecnológico.....	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1:	La Atmósfera dividida en celdas tridimensionales	16
Figura 3.1:	Resumen de cambios observados en clima y otros factores ambientales en regiones representativas de América del Norte, América Central y América Sur.....	18
Figura 3.2:	Relación entre el cambio climático y la Gestión de Riesgos.....	19
Figura 3.3:	Localización de la zona de implementación del Modelo conceptual para La implementación de Sistemas de Alerta Temprana.....	25
Figura 4.1:	Representación gráfica del Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana.....	26
Figura 4.2:	Estructura para la Determinación del Riesgo en la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana.....	27
Figura 4.3:	Selección de Sensores del Sistema de Alerta Temprana.....	29
Figura 4.4:	Emisión de la Alerta del Sistema de Alerta Temprana.....	31
Figura 4.5:	Comportamiento climático de la Temperatura Mínima del aire en Imata durante 1936 a 2013.....	34
Figura 4.6:	Comportamiento climático de la Temperatura Mínima del aire en Caylloma durante 1936 a 2013.....	34
Figura 4.7:	Variación Multianual de la Temperatura Mínima media mensual en Imata para el mes de enero.....	35
Figura 4.8:	Variación Multianual de la Temperatura Mínima media mensual en Imata para el mes de julio.....	36
Figura 4.9:	Pronóstico mensual a escala diaria de eventos extremos fríos para Imata, válido del 01 al 31 de agosto de 2014	37
Figura 4.10:	Pronóstico mensual a escala diaria de eventos extremos fríos para Imata, válido del 01 al 31 de octubre de 2014	37
Figura 4.11:	Valor observado y rango diario del pronóstico para Imata, correspondiente al mes de julio de 2014	38
Figura 4.12:	Valor observado y rango diario del pronóstico para Imata, correspondiente al mes de agosto de 2014	39
Figura 4.13:	Red de Estaciones climáticas de monitoreo	41
Figura 4.14:	Red de estaciones instaladas para el Sistema de Alerta Temprana.....	42

Figura 4.15: Servidor Central en el Municipio de Imata	43
Figura 4.16: Taller de Capacitación sobre Eventos Extremos fríos a estudiantes de nivel Secundario en Imata	44
Figura 4.17: Taller de Capacitación en el Centro Poblado de Imata a Colaboradores Responsables del Sistema de Alerta Temprana	45
Figura A.1: Número y tipo de eventos registrados por año, 1970-2011 en el Perú.....	55
Figura A.2: Impacto en la población y viviendas según desastres en el periodo 2003-2012 en el Perú.....	55

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A:	55
----------------	----

RESUMEN

El cambio climático trae como consecuencia la alta variabilidad en periodicidad, frecuencia e intensidad de los eventos extremos climáticos, los que son más evidentes en el Perú por ser un país altamente vulnerable al cumplir siete razones de las nueve establecidas por Naciones Unidas para identificar países vulnerables ante los impactos del cambio climático, por otro lado en el Perú no se cuenta con mucha información climática histórica mayor para un periodo mayor de 30 años, no permitiendo de esta forma determinar los impactos del cambio climático a escala local. En ese sentido el presente trabajo de investigación desarrolla un Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana con fines de prevención frente a la ocurrencia de eventos extremos climáticos, este modelo conceptual se fundamenta en la integración de los aspectos científicos, tecnológicos y sociales, de forma sinérgica y sistemática basado en el método científico. El Modelo conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana toma de referencia estándares internacionales en la gestión de riesgos, conceptos internacionales sobre impactos del cambio climático, documentos normativos internacionales y se presenta como una alternativa de solución frente a la recurrencia de eventos extremos climáticos en el Perú, el Modelo conceptual establece a una secuencia, un proceso y define pautas para la implementación de forma que garantice la sostenibilidad científica y social de Sistemas de Alerta Temprana en el Perú. Este Modelo Conceptual fue aplicado a un caso relacionado con la ocurrencia de eventos extremos climáticos fríos en zonas alto andinas y los resultados muestran que la calidad de vida de la población mejora con el uso de la información proporcionada que es generada con soporte científico, difundida con uso de tecnología de punta y utilizada por la población de acuerdo a sus necesidades frente al mismo evento extremo frío.

Palabras Clave

Sistemas de Alerta Temprana, Gestión de Riesgos, Eventos extremos, Cambio Climático,

ABSTRACT

Climate change results in the high variability in periodicity, frequency and intensity of extreme climatic events, which are most evident in Peru for being a highly vulnerable country, because seven characteristics of the nine established by the United Nations to identify vulnerable countries, in Peru there is poor the historical information greater than 30 years, thus not allowing to determine the impacts of climate change at local level for to best management of the impacts. In this sense, this research work develops a Conceptual Model for the implementation of Early Warning Systems for prevention purposes against the occurrence of extreme climatic events, this conceptual model is based on synergistic and systematic integration based on the scientific method of scientific, technological and social aspects. The Conceptual Model for the Implementation of Early Warning Systems takes reference international standards in risk management, international concepts on climate change impacts, international normative documents and is presented as an alternative solution to the recurrence of extreme climatic events in Peru, the Conceptual Model proposes a sequence, a process and establishes guidelines for implementation in a way that guarantees the scientific and social sustainability of Early Warning Systems in Peru. This Conceptual Model was applied to a case related to the occurrence of extreme cold climatic events in high Andean areas and the results show that the population's quality of life improves with the use of the information provided that is generated with scientific support, disseminated with use of cutting-edge technology and used by the population according to their needs in the face of the same extreme cold event.

Keywords:

Early Warning Systems, risk management, Extreme events, climate change.

I. INTRODUCCIÓN

El Perú, debido a su ubicación, geografía y mar territorial, posee una diversa gama de ecosistemas, alta diversidad biológica y gran riqueza de recursos naturales que proveen diversos bienes y servicios (Rodríguez & Young 2000; Josse *et al.* 2009), lo que naturalmente debido a los procesos físicos que representan la interacción entre la atmósfera y la superficie genera como consecuencia un país con una diversidad de climas a lo largo del territorio, los que conjugados con la diversidad topográfica, geomorfológica, caracterizan al país, como un país vulnerable a los riesgos naturales que por sus impactos podrían ocasionar desastres naturales.

En el caso del Perú, el comportamiento climático es cíclico, estableciéndose de este modo, los periodos secos o lluviosos, lo cual está relacionado con el ciclo hidrológico, estos comportamientos tienen variaciones en cada ciclo respectivo, estas variaciones expresadas en anomalías, las que dependiendo de su magnitud puede ocasionar impactos diversos en el ecosistema y de hecho afectación a la vida humana, en ese sentido se hace necesario implementar sistemas de punta con base científica y tecnológica que permitan la gestión anticipada de los impactos.

Considerando, el proceso de cambio climático, el que, según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), los eventos extremos climáticos han alterado su intensidad, frecuencia y periodicidad (IPCC, 2011), por lo que recomienda que los extremos climáticos deberían ser analizados a escala local para la disminución de sus impactos. Y siendo el Perú altamente vulnerable al cambio climático, por responder a 7 de las 9 razones establecidas por naciones y por ser uno de los diez países más megadiversos del mundo (MINAM, 2012), la gestión de los impactos de los eventos extremos climáticos es de alta relevancia.

El Perú es afectado por la ocurrencia de eventos extremos fríos, el cual puede expresarse como heladas, nevadas, granizadas, los que afectan principalmente a la zonas alto andinas del Perú, durante los inviernos, llegando en el caso de temperaturas a 20 grados bajo cero y con altura de nieve de 50 cm, han ocasionado pérdidas económicas en la agricultura y la ganadería, lo cual se verifica en el Atlas de Heladas, publicada por SENAMHI (2010), que resalta que las zonas que son más afectadas por eventos extremos fríos son las regiones alto andinas.

Asimismo, en el Perú en el caso de Precipitaciones, las que ocasionan desastres y riesgos son las precipitaciones intensas. Climáticamente los meses del verano austral son lluviosos en la mayor parte del país, pero debido a procesos regionales, globales, sinópticos, de circulación estacional, procesos de teleconexiones e incluso El Niño, así como el mismo proceso de cambio climático, este comportamiento natural de lluvias es anómalo, ocasionando periodos de precipitaciones intensas que ocasionan inundaciones, como son los casos de los conocidos, El Niño 82/83, El Niño 97/98, que afectaron principalmente a la región Norte del País, pero los impactos fueron a nivel de todo el Perú; o el caso sinóptico de febrero 2015, donde llovió por 4 días en todo el país, ocasionando pérdidas económicas y humanas a nivel de todo el país. En el Perú, los casos de movimientos en masa, también son aspectos que deben ser considerados como parte de la gestión de riesgos, pues los movimientos en masas de acuerdo a su proceso pueden ocasionar hasta pérdidas de ciudades, caso Huancavelica, centro poblado de Cuenca, 2014, referenciado por el estudio sobre inspección Técnica Geológica en el centro Poblado de Cuenca de INGEMMET (2014).

En general, los eventos climáticos, geofísicos, geomorfológico, debido al avance científico son conocidos y existe el conocimiento básico para su entendimiento lo que facilita la gestión de los mismos. En el caso de los eventos relacionados con el clima, el desarrollo tecnológico actual permite monitorear en escala de tiempo de segundos o menores comportamientos climáticos, significa a la escala de tiempo real, lo que de hecho complementa la gestión adecuada de los impactos de estos eventos al entendimiento y representación física en modelos físicos y dinámicos. Al mismo tiempo, el SINAGERD (Sistema de Nacional de Gestión de Riesgos Desastres), considera en su normativa el

involucramiento de la población como parte del proceso de gestión desde la prevención hasta la atención y respuesta.

En el contexto internacional, el Acuerdo Marco de SENDAI para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, (Naciones Unidas), establece cuatro prioridades de acción: *Prioridad 1. Comprender el riesgo de desastres, Prioridad 2: Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo, Prioridad 3: Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia y Prioridad 4: Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.*

A nivel nacional, Plan Nacional de Gestión de Riesgos, PLANAGERD (2014-2021), muestra peligros por distinto origen ocurridos en el Perú, desde 1970 al 2011, siendo: Actividad volcánica, Contaminación, Deslizamiento, Heladas, Inundación, Sismo, y Aluvión (Huayco) de los cuales 5 tipos de peligro (deslizamiento, Inundación, Aluvión, Contaminación y Heladas) están relacionados con comportamiento atmosférico de tiempo y clima, denominados peligros hidrometeorológicos, la representación gráfica puede ser verificada en el Anexo I. Por otro lado, PLANAGERD (2014-2021) identificó el impacto de los desastres en la población y vivienda según tipo de peligro para el periodo entre 2003 a 2012, observándose que las personas afectadas por riesgos hidrometeorológicos superan el 80 por ciento de todas las personas afectadas, las personas danmificadas superan el 40 por ciento de total de danmificadas, en el caso de viviendas afectadas el 77 por ciento de ellas fue afectada por los desastres de tipo hidrometeorológico, y las viviendas destruidas alrededor de 29 por ciento relacionadas por desastres de tipo hidrometeorológicos; la representación gráfica de estos valores se puede observar en el Anexo I.

Por otro lado, CARE, organización no gubernamental sin fines de lucro realiza un levantamiento de proyectos denominados Sistemas de Alerta Temprana e identifica 38 experiencias realizadas en el Perú entre 200 y 2013 relacionados con Sistemas de Alerta Temprana Modelos Comunitarios, SATMC, se observa que de las experiencias analizadas a pesar de la intervención de entidades técnicas no se muestran resultados científico, es decir publicaciones científicas, por otro lado, la tecnología utilizada está relacionada con

estaciones de monitoreo, y no identifica sistemas automatizados, en este sentido, no se visualiza la sinergia entre la ciencia, tecnología y sociedad.

Considerando estos aspectos, se identifica la necesidad de una herramienta que apoye la gestión de riesgos en el país, focalizada en la prevención de riesgos principalmente los climáticos que afectan la economía del país, sin descartar su aplicación a eventos que ocasionan desastres y riesgos a la población. La herramienta propuesta busca de forma objetiva la integración del conocimiento científico, el desarrollo tecnológico y la participación social. En este sentido, la presente investigación presenta el siguiente objetivo principal:

Desarrollar un Modelo Conceptual que integre la Ciencia, Tecnología y Sociedad para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana como instrumento para la Gestión de Riesgos de Desastres Naturales.

Siendo los objetivos específicos:

1. Elaborar un Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT
2. Aplicar el Modelo Conceptual para la Implementación del Sistema de Alerta Temprana - McSAT a un caso práctico para eventos extremos en el Perú – Caso Eventos Extremos fríos

Este Modelo Conceptual, aplicado a eventos extremos fríos, además tiene la finalidad de servir de prototipo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana para otro evento natural de origen climático, geofísico, geomorfológico, hidrológico, entre otros, que podría causar un impacto expresado en desastres.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

El Perú, es un país vulnerable a los efectos del cambio climático y presenta siete de las nueve características de vulnerabilidad reconocidas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC): zonas costeras bajas; zonas áridas y semiáridas; zonas expuestas a inundaciones, sequía y desertificación; y ecosistemas montañosos frágiles. Adicionalmente, continúa su crecimiento poblacional y de la ocupación de un territorio con amenazas crecientes por fenómenos hidrometeorológicos relacionados con el Fenómeno El Niño; con persistencia de pobreza, ecosistemas amenazados, glaciares tropicales en reducción, problemas de distribución de recursos hídricos, actividad económica altamente dependiente del clima y limitada institucionalidad y capacidad de organización y recursos para hacer frente a los impactos del cambio climático.

2.1. Ciencia y Tecnología sobre Gestión de Riesgos

En el contexto de Ciencia y Tecnología el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), el año 2016, publicó el Programa Nacional de Ciencia y Tecnología Ambiental – CINTyA en el que se resalta que Gestión de Riesgos es un Área Temática Prioritaria para el país, que atendería a desafíos nacionales establecidos por CONCYTEC: Ambiente Sostenible y Seguridad Alimentaria, mencionando además que para promover ésta Área Temática deben ser fortalecidos a corto y mediano plazo los indicadores de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CTI), relacionados con incrementar la masa crítica de investigadores, los laboratorios de investigación y las publicaciones indexadas. CINTyA resalta que Gestión de Riesgos como área temática priorizada para el país, debe considerar las líneas priorizadas en: los Sismos, actividad y fenómenos asociados, Eventos extremos Climáticos e hidrológicos, Erosión, transporte de sedimentos y movimientos en masa, Sistemas de Alerta temprana y Eventos Geoespaciales.

Al mismo tiempo CINTyA resalta en la definición para Sistemas de Alerta Temprana que están relacionados con Ciencia, Tecnología y sociedad.

En el Perú, los riesgos a peligros naturales, consisten en sismos, lo que involucra la actividad volcánica y los fenómenos asociados, esto debido a que el Perú se encuentra ubicado en el contorno peri-Pacífico y en la zona de convergencia de dos grandes placas tectónicas: la placa Sudamericana y placa de Nazca, que se introduce por debajo de la Sudamericana a una velocidad relativa de 6 a 7 cm/año en dirección noreste (Norabuena *et al.* 1998). Los sismos se originan en la interfaz o zona de contacto de placas, en donde existen áreas de asperezas distribuidas de manera heterogénea que impiden su desplazamiento; esto ocasiona acumulación de esfuerzos en la interfaz, lo cual da lugar a la ruptura que ocasiona el sismo al superar cierto umbral. La historia sísmica de nuestro país muestra que este ha sido sacudido por grandes sismos destructivos generadores de tsunamis, los cuales han ocasionado pérdidas de vidas y gran impacto económico (Comte & Pardo 1991; Tavera & Bernal 2008; Perfettini *et al.* 2010; Chlieh *et al.* 2011; Villegas-Lanza 2014). Asimismo, en el interior del continente también ocurren sismos de magnitud moderada, que son producto de la interacción de las fallas corticales, y que al ocurrir cerca de la superficie suelen ser perjudiciales. Por otro lado, una franja de más de 500 km en la cordillera occidental del sur del país aloja una docena de volcanes activos (Legeley-Padovani *et al.* 1997; Rivera *et al.* 1998, 2010; Thouret *et al.* 2005) que representan una amenaza a las poblaciones humanas de esa región. Actualmente, los volcanes Ubinas (Moquegua) y Sabancaya (Arequipa) muestran actividad, aunque de bajo nivel. Peligros específicos importantes son las caídas de cenizas, los lahares y los flujos piroclásticos que se produzcan durante una erupción de mayor intensidad.

Respecto al aspecto climáticos e hidrológicos, el Perú es un país altamente vulnerable a los eventos extremos climáticos e hidrológicos, los cuales pueden tener su origen en la variabilidad atmosférica de corto plazo como heladas, friajes, tormentas, etc. (Marengo *et al.* 1997; Garreaud 2000; Boers *et al.* 2013; Espinoza *et al.* 2015) o pueden estar relacionados a la variabilidad interanual, como El Niño Oscilación Sur (ENOS).

El Niño es el incremento persistente de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico ecuatorial que trae consigo cambios en las corrientes oceánicas y la composición

de especies marinas. Además, El Niño ocasiona severos trastornos en la circulación atmosférica que afectan las lluvias y caudales. Entre sus impactos se pueden mencionar fuertes inundaciones en la costa norte del Perú (Takahashi 2004; Douglas *et al.* 2009; Lavado-Casimiro *et al.* 2013a) y un déficit en las lluvias en el Altiplano y la región Andina (Lagos *et al.* 2008; Lavado-Casimiro & Espinoza 2014), así como sequías en la cuenca amazónica (Espinoza *et al.* 2011a, 2013; Lavado-Casimiro & Espinoza 2014). En la Amazonía, las sequías y el incremento de incendios forestales están generalmente asociados a eventos El Niño y a condiciones cálidas en el océano Atlántico tropical norte. En cambio, la intensificación de lluvias e inundaciones están a menudo asociados a eventos La Niña (Espinoza *et al.* 2013, 2014; Brando *et al.* 2014; Marengo & Espinoza 2015).

En los últimos cuarenta años, las lluvias y caudales en la cuenca amazónica han mostrado una fuerte disminución (-10 %), en particular debido a un calentamiento en el océano Atlántico y los eventos hidrológicos extremos son más frecuentes desde inicio de los años noventa (Espinoza *et al.* 2009; Marengo & Espinoza 2015). Las sequías extremas en la cuenca amazónica han puesto en riesgo el futuro del bosque amazónico, el cual desempeña un rol fundamental en el sistema climático en el ámbito regional y global (Phillips *et al.* 2009; Gatti *et al.* 2014; Brienen *et al.* 2015). ENOS es una de las más importantes fuentes de variabilidad climática interanual a nivel global, pero a pesar de décadas de esfuerzo en investigación aún se requiere mejorar nuestra capacidad de predicción a escala local y regional (Cai *et al.* 2015; Takahashi & Dewitte 2015). Los eventos El Niño no tienen frecuencia, intensidad ni duración constantes, y los modelos estocásticos actualmente pueden predecir el inicio de un evento, pero es más difícil determinar su intensidad, duración e impacto ecosistémico positivo o negativo, económico y social. Un mejor entendimiento de estos fenómenos, su modelado y su previsión serán de fundamental importancia para la gestión ambiental y de desastres naturales en el Perú.

Respecto a las temperaturas, en el Perú estudios de monitoreo han mostrado la existencia de olas de calor principalmente en la región de Lima, (Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de Lima Metropolitana, 2013), identificando algunos focos de calor y frío que podrían ocasionar impactos en la población.

Otros procesos físicos como la erosión y transporte de sedimentos son poco estudiados en el Perú. Sin embargo, su monitoreo y modelado resulta de suma relevancia para el adecuado diseño de infraestructura que pueda ser aplicada a hidráulica, saneamiento y en casos de agricultura para irrigación, condicionando su tiempo de vida. El estudio del transporte de sedimentos permite cuantificar la erosión y degradación de suelos a escala de cuenca (Tote *et al.* 2011; Espinoza Villar *et al.* 2012; Armijos *et al.* 2013; Morera *et al.* 2013; Pepin *et al.* 2013), lo cual contribuye a la toma de decisiones en la gestión integrada de cuencas. Además, permite conocer los orígenes de la pérdida de suelo, tanto debido a eventos climáticos extremos como El Niño o por intervención antrópica como deforestación, agricultura, minería, etc. (Tote *et al.* 2011; Morera *et al.* 2013; Pepin *et al.* 2013). En el Perú, los fenómenos geodinámicos más recurrentes son los movimientos en masa, siendo la zona andina y subandina las más afectadas (Villacorta *et al.* 2012). Eventos recientes como las grandes avalanchas ocurridas en el nevado Huascarán en 1962 y 1970 (Evans *et al.* 2009) nos muestran que un solo evento de este tipo puede ocasionar grandes pérdidas materiales y humanas en un lapso muy corto de tiempo y con una recurrencia muy alta. Dado que los movimientos en masa pueden ocurrir debido a una gran variedad de detonantes: sismos, eventos meteorológicos extremos, mal uso del suelo, entre otros, la investigación de la dinámica y cinemática de estos procesos mediante modelado e instrumentación (Mentes 2015) permitirá una mejor gestión del territorio y minimizar las pérdidas humanas y económicas mediante mapas de peligros más precisos.

Todos los peligros relacionados directamente con la actividad interna de la Tierra deben ser investigados en sus distintas facetas: física de los procesos, seguimiento permanente de los eventos, transmisión y procesamiento de la información, identificación de premonitores, desarrollo de métodos de pronóstico, y modelado de los procesos que dan origen a estos peligros; la finalidad es brindar un reporte útil para la toma de decisiones que permitan salvar vidas y reducir los impactos económicos (Thouret *et al.* 1999; Finizola *et al.* 2004; Tort & Finizola 2005).

2.2 Marco Normativo sobre Gestión de Riesgos

En el contexto internacional, el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, elaborado por Naciones Unidas, resalta 13 principios rectores para la Reducción del riesgo de Desastres, de los cuales el primero menciona:

- *Cada Estado tiene la responsabilidad primordial de prevenir y reducir el riesgo de desastres, incluso mediante la cooperación internacional, regional, subregional, transfronteriza y bilateral. La reducción del riesgo de desastres es un problema común de todos los Estados y la medida en que los países en desarrollo puedan mejorar y aplicar eficazmente las políticas y medidas nacionales de reducción del riesgo de desastres, en el contexto de sus respectivas circunstancias y capacidades, puede mejorar aún más por medio de la cooperación internacional sostenible;*

Bajo este contexto la Gestión de Riesgo de Desastres a pesar de ocasionar impactos locales, su gestión va más allá de las fronteras geográficas, de los intereses nacionales, institucionales, temáticos es decir promueve una mirada interinstitucional. Estos principios rectores son la herramienta esencial para la Gestión del Riesgo de Desastres, son presentados a continuación como base fundamental en el desarrollo de esta investigación.

- *Para la reducción del riesgo de desastres es necesario que las responsabilidades sean compartidas por los gobiernos centrales y las autoridades, los sectores y los actores nacionales pertinentes, como corresponda según sus circunstancias y sistemas de gobernanza nacionales;*

Esto implica que la adecuada Gestión es de carácter multidisciplinario, interinstitucional y sinérgico.

- *La gestión del riesgo de desastres está orientada a la protección de las personas y sus bienes, salud, medios de vida y bienes de producción, así como los activos culturales y ambientales, al tiempo que se respetan todos los derechos humanos, incluido el derecho al desarrollo, y se promueve su aplicación;*
- *La reducción del riesgo de desastres requiere la implicación y colaboración de toda la sociedad. Requiere también empoderamiento y una participación inclusiva,*

accesible y no discriminatoria, prestando especial atención a las personas afectadas desproporcionadamente por los desastres, en particular las más pobres. Deberían integrarse perspectivas de género, edad, discapacidad y cultura en todas las políticas y prácticas, y debería promoverse el liderazgo de las mujeres y los jóvenes. En este contexto, debería prestarse especial atención a la mejora del trabajo voluntario organizado de los ciudadanos;

Estos principios rectores resaltan la necesidad de introducir un componente social en el proceso de Gestión del riesgo, pues la intervención de la sociedad garantiza el desarrollo humano y la participación social con inclusión.

- *La reducción y la gestión del riesgo de desastres dependen de los mecanismos de coordinación en todos los sectores y entre un sector y otro y con los actores pertinentes a todos los niveles, y requiere la plena participación de todas las instituciones ejecutivas y legislativas del Estado a nivel nacional y local y una articulación clara de las responsabilidades de los actores públicos y privados, incluidas las empresas y el sector académico, para asegurar la comunicación mutua, la cooperación, la complementariedad en funciones y rendición de cuentas y el seguimiento;*
- *Si bien la función propiciadora, de orientación y de coordinación de los gobiernos nacionales y federales sigue siendo esencial, es necesario empoderar a las autoridades y las comunidades locales para reducir el riesgo de desastres, incluso mediante recursos, incentivos y responsabilidades por la toma de decisiones, como corresponda;*

Este principio rector nos obliga al trabajo sinérgico, estableciendo jerarquías y responsabilidades en el marco nacional, regional y local, con el conformación de mesas de trabajo multidisciplinarias, con la generación de normatividad y reglamentación necesaria que resalte el rol y responsabilidad en todos los niveles.

- *La reducción del riesgo de desastres requiere un enfoque basado en múltiples amenazas y la toma de decisiones inclusiva fundamentada en la determinación de los riesgos y basada en el intercambio abierto y la divulgación de datos*

desglosados, incluso por sexo, edad y discapacidad, así como de la información sobre los riesgos fácilmente accesible, actualizada, comprensible, con base científica y no confidencial, complementada con los conocimientos tradicionales;

Este principio rector, se refiere a considerar el enfoque multidisciplinario en la gestión de Riesgos, garantizar que la información sea de libre acceso con niveles altos de confiabilidad y que lleve en consideración el conocimiento ancestral.

- *La elaboración, el fortalecimiento y la aplicación de las políticas, planes, prácticas y mecanismos pertinentes deben buscar que exista coherencia, como corresponda, entre las agendas para el desarrollo y el crecimiento sostenibles, la seguridad alimentaria, la salud y la seguridad, la variabilidad y el cambio climático, la gestión ambiental y la reducción del riesgo de desastres. La reducción del riesgo de desastres es esencial para lograr el desarrollo sostenible;*

Con este principio rector, se introduce el concepto que la Gestión de Riesgos debidamente implementada es la base del Desarrollo Sostenible, que es lograda bajo la integración interinstitucional, sinérgica y en la lógica de establecer el marco normativo respetando los niveles de gobierno.

- *Si bien los factores que pueden aumentar el riesgo de desastres pueden ser de alcance local, nacional, regional o mundial, los riesgos de desastres tienen características locales y específicas que deben comprenderse para determinar las medidas de reducción del riesgo de desastres;*

Con este principio rector, se resalta que la gestión de riesgo debe ser implementada a escala local, para evitar que los impactos tengan alcance nacional, regional o global, considerando el concepto de teleconexiones y el equilibrio atmosférico, representado por las ecuaciones de balance de energía, de balance de masa aplicadas al comportamiento atmosférico.

- *Enfrentar los factores subyacentes al riesgo de desastres mediante inversiones públicas y privadas basadas en información sobre estos riesgos es más rentable*

que depender principalmente de la respuesta y la recuperación después de los desastres, y contribuye al desarrollo sostenible;

- *En la fase de recuperación, rehabilitación y reconstrucción después de los desastres, es fundamental prevenir nuevos desastres y reducir el riesgo de desastres mediante el principio de “reconstruir mejor” e incrementar la educación y la sensibilización públicas sobre el riesgo de desastres;*

La gestión de riesgo de desastres, considerando que bien implementada puede llevar al desarrollo Sostenible, es necesario considerar que en su proceso de implementación es necesario la inversión y financiamiento y para esto se deben involucrar entidades públicas y privadas, desde el punto de vista económico la inversión en la respuesta y la recuperación son el camino del Desarrollo Sostenible de la población afectada.

- *Una alianza mundial eficaz y significativa y el mayor fortalecimiento de la cooperación internacional, incluido el cumplimiento de los compromisos respectivos en materia de asistencia oficial para el desarrollo por parte de los países desarrollados, son esenciales para una gestión eficaz del riesgo de desastres;*
- *Los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños Estados insulares en desarrollo, los países en desarrollo sin litoral y los países africanos, así como los países de ingresos medianos y otros países que enfrentan problemas específicos de riesgo de desastres, necesitan apoyo suficiente, sostenible y oportuno, incluso con financiación, transferencia de tecnología y creación de capacidad de los países desarrollados y los asociados, ajustado a sus necesidades y prioridades, según las definan ellos mismos.*

Las alianzas internacionales son esenciales en el proceso de Gestión de riesgo de desastres, pues estos fortalecen las capacidades científicas y tecnológicas, fortalecen los sistemas de evaluación y monitoreo, promueven en intercambio de experiencias científicas, tecnológicas y sociales.

En el contexto nacional, en el Perú, la Gestión de Riesgos se basa en la Ley N°29664, ley que crea el Sistema Nacional de Gestión de Riesgos, conformado por diversas entidades del estado, y se basa en el Plan Nacional de Gestión de Riesgos PLANGERD, documento vigente hasta el 2021.

2.3. Modelamiento Numérico relacionado con la Gestión de Riesgos

Un *modelo de predicción numérica* es una representación matemática codificada a lenguaje de ordenador de los procesos dinámicos, físicos, químicos y radiactivos de la atmósfera (Jacobson, M., 2005, p.6). (Coiffier, J. 2012, p.xi) menciona que los modelos no solo son un sistema de ecuaciones que gobiernan el comportamiento continuo de la atmósfera, sino también hay que incluir en la definición la forma en que estas ecuaciones son resueltas en el modelo. Las soluciones a esas ecuaciones son plasmadas en algoritmos, por lo que los *modelos numéricos atmosféricos* están organizados en programas de computadora. Al estar organizados en programas informáticos y seguir los procedimientos de la ingeniería de *software*, un modelo se expresa computacionalmente como un *software* (Brookshear, J. 2012, p.2), aunque conceptualmente un modelo atmosférico no sea un *software*.

Con el avance y el desarrollo de estos modelos numéricos y el avance también de la potencia de las computadoras, los *modelos de predicción numérica* tienen en la actualidad diversas aplicaciones. En (Warner. T. T., 2011, cap.1) se menciona que estos modelos pueden ser utilizados en agricultura para estimar periodos de siembra, de cosechas e irrigaciones; determinar lugares donde fijar determinados cultivos; en la aviación para estimar turbulencias, nubosidad, formación de hielo, etc.; en el sector energético para predecir el tiempo y estimar la demanda de electricidad, calefacción y refrigeración; para estimar los mejores lugares donde se pueda construir fuentes de energías renovables. Una de las principales aplicaciones de estos modelos se da cuando estos son acoplados con otros tipos de modelos tales como modelos de calidad de aire, modelos hidrológicos (para predecir inundaciones) o modelos climáticos (para predecir eventos climáticos como el Fenómeno de El Niño).

Los *modelos de predicción numérica* se pueden clasificar en modelos globales que cubren toda la superficie de la tierra y en modelos de mesoescala o también llamados modelos

regionales. Estos últimos, por enfocarse en un área específica de la tierra para realizar sus simulaciones, son también llamados modelos de área limitada (Coiffier, J. 2011, p.263). Los modelos globales se encargan de predecir procesos atmosféricos a escala planetaria tales como ciclones, anticiclones, etc., en cambio los modelos de mesoescala tienen una suficiente resolución vertical y horizontal para simular procesos atmosféricos tales como turbulencia, convección de nubes, tornados, tormentas, estados del mar, etc.

Para entender cómo funciona un modelo numérico hay que saber que cada modelo numérico se divide en dos partes: la dinámica y la física del modelo (Dudhia, J. 2014). La parte dinámica del modelo está conformada por las ecuaciones primitivas que gobiernan la dinámica de la atmósfera, y la parte física está conformada por los procesos físicos a nivel local que no pueden resolverse directamente y que por eso tienen que ser representados dentro del modelo de forma simplificada.

2.3.1 Las ecuaciones gobernantes del Modelamiento Numérico Atmosférico

Anteriormente se mencionó que un *modelo numérico* es un sistema de ecuaciones que representan la dinámica de la atmósfera. Este sistema de ecuaciones es la base para el desarrollo de los modelos de predicción numérica (Warner, T. 2011, p.6). Las ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv \tan \phi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - 2\Omega(w \cos \phi - v \sin \phi) + Fr_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \phi + Fr_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{u^2 + v^2}{a} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - 2\Omega u \cos \phi - g + Fr_z \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} + (\gamma - \gamma_d)w + \frac{1}{c_p} \frac{dH}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial x} - v \frac{\partial \rho}{\partial y} - w \frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -u \frac{\partial q_v}{\partial x} - v \frac{\partial q_v}{\partial y} - w \frac{\partial q_v}{\partial z} - Q_v \quad (6)$$

$$p = \rho RT \quad (7)$$

Las tres primeras ecuaciones, (1) a (3), son ecuaciones de momento para una Tierra esférica, los cuales representan a la segunda ley del movimiento de Newton. La ecuación (4) representa la ecuación termodinámica de la conservación de la energía. La ecuación de continuidad para la masa total está representada en la ecuación (5). La ecuación (6) es análoga a la ecuación (5), solo que esta aplicada para vapor de agua. Y por último la ecuación que representa la ley de los gases ideales (7). Las variables meteorológicas tienen su significado *standard*. Las variables independientes u , v y w son las componentes de velocidad cartesiana, p es la presión, ρ es la densidad, T es la temperatura, q_v es la humedad específica, Ω es la frecuencia rotacional de la Tierra, ϕ es la latitud, a es el radio de la tierra, γ es el gradiente de temperatura, γ_d es el gradiente adiabático seco, c_p es el calor específico del aire a presión constante, g es la aceleración de la gravedad, H representa la pérdida o ganancia de calor, Q_v es la pérdida o ganancia de vapor de agua a través de cambios físicos, y Fr es un término de fricción genérica en cada dirección de coordenada.

Este sistema de ecuaciones recibe el nombre de *ecuaciones gobernantes de la dinámica de la atmósfera* o también *ecuaciones primitivas*; todos los modelos de predicción numérica ya sea operacionales o de investigación están basados sobre alguna versión de estas ecuaciones (Warner, T. 2011, p.7). La exacta formulación y resolución de estas ecuaciones puede afectar la precisión de los pronósticos y simulaciones.

2.3.2. El Sistema de Modelamiento Numérico Atmosférico

El proceso de simulación en un modelo consiste en resolver las ecuaciones gobernantes de la dinámica de la atmósfera en puntos determinados de cada celda de simulación (Warner, T. 2011, p.20), figura 2.1, al mismo tiempo que las parametrizaciones también son resueltas en cada celda (NOAA, et al. MetEd. 2008). De esa forma la atmósfera evoluciona en el tiempo en cada celda calculándose los valores de las variables meteorológicas en puntos específicos de cada celda para cada cierto tiempo. A ese proceso de resolver las ecuaciones en determinados puntos de cada una de estas celdas tridimensionales ya no para variables continuas sino ahora para variables discretas y en cada cierto tiempo, se denomina *discretización* (Coiffer, J. 2011, p.1).

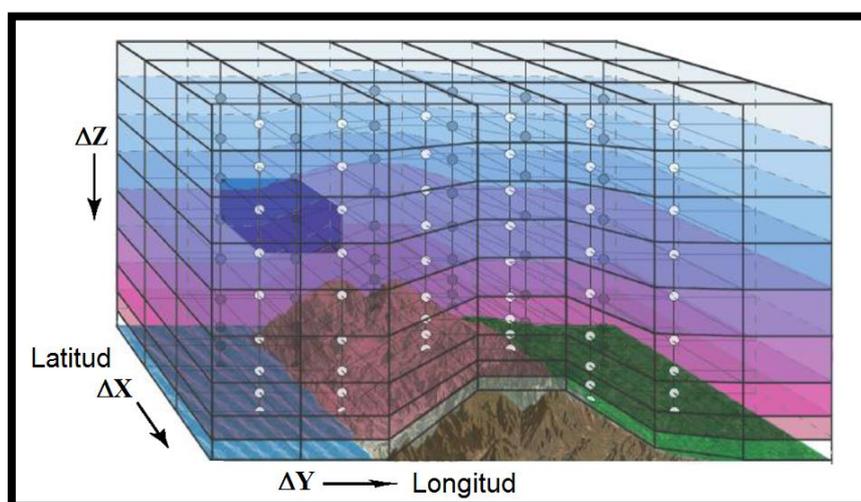


Figura 2.1 La Atmósfera dividida en celdas tridimensionales (FUENTE: Neelin, J. David., 2011)

Las ecuaciones físicas deben ser resueltas matemáticamente en un sistema computacional de procesamiento rápido, sobre todo si deben ser utilizados para fines de pronóstico. En este sentido, por ejemplo el Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) de Brasil, cuenta actualmente con un Supercomputador Cray XE6, cuyas características son: 13 nudos de acceso interactivo, con una memoria total agregada de 1.66 TeraBytes de memoria. Cada nudo tiene 128 GB de memoria compartida, 4 procesadores quad-core AMD Opteron. 20 nudos de procesamiento auxiliar, y cada uno de ellos con 128 GB de memoria y 4 procesadores quad-core AMD Opteron. 1304 nudos computacionales Cray XE6 con 32 GB de memoria y 2 procesadores de 12-core AMD Opteron, además de 32 nudos de servicio con 8GB de memoria cada uno y 2 procesadores dual-core AMD Opteron por nudo. (<http://supercomputacao.inpe.br/documentacao2#caracteristicas>)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Considerando que esta investigación se basa en el desarrollo de un Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana, los insumos necesarios son la base científica existente en Gestión de Riesgos en publicaciones internacionales, así como documentos normativos nacionales e internacionales aprobados oficialmente. La propuesta es parte de un análisis crítico y científico de los documentos existentes para el desarrollo del Modelo Conceptual el que fue implementado para el caso de eventos extremos fríos en zonas alto andinas de Perú, considerando que son eventos recurrentes y afectan la calidad de vida de las personas. Iniciamos el desarrollo de la metodología con una descripción sucinta, crítica y analítica de la literatura utilizada para el diseño del Modelo Conceptual (McSAT) seguido del proceso metodológico para la implementación práctica del Modelo Conceptual para Eventos Extremos Fríos.

3.1 Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana - McSAT

Para el cumplimiento del Objetivo General que consiste en el desarrollo de un Modelo conceptual para Sistemas de Alerta Temprana – Mc-SAT, se ha considerado, aspectos científicos provenientes de informes internacionales como los denominados “Assesment Report (AR)”, elaborados por el por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (The Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), los que desde el primer Assesment Report (AR1) elaborado en 1990, y siendo los siguientes, Assesment Reporte 2 (AR2) en 1995, seguido del Third Assesment Report (TAR) en 2001, el Assesment Report 4 (AR4), publicado el 2007, y el último reporte Assesment Report 5 (AR5) publicado en 2014, y actualmente está siendo preparado el Assesment Report 6 (AR6), para ser publicado el 2021. Resaltan que los impactos del cambio climático afectan al mundo de diversas formas y que los impactos deben ser gestionados a escala local a pesar que la

física del comportamiento es el mismo, por lo que el conocimiento científico es uno de los uno de los factores a considerar en la propuesta del McSAT.

Por otro el mismo IPCC en los Summary for Policymakers (Resumen para tomadores de decisión), en los cuales se presentan de forma sucinta y gráfica los impactos más resaltantes y recomiendan acciones necesarias frente al cambio climático a escala país.

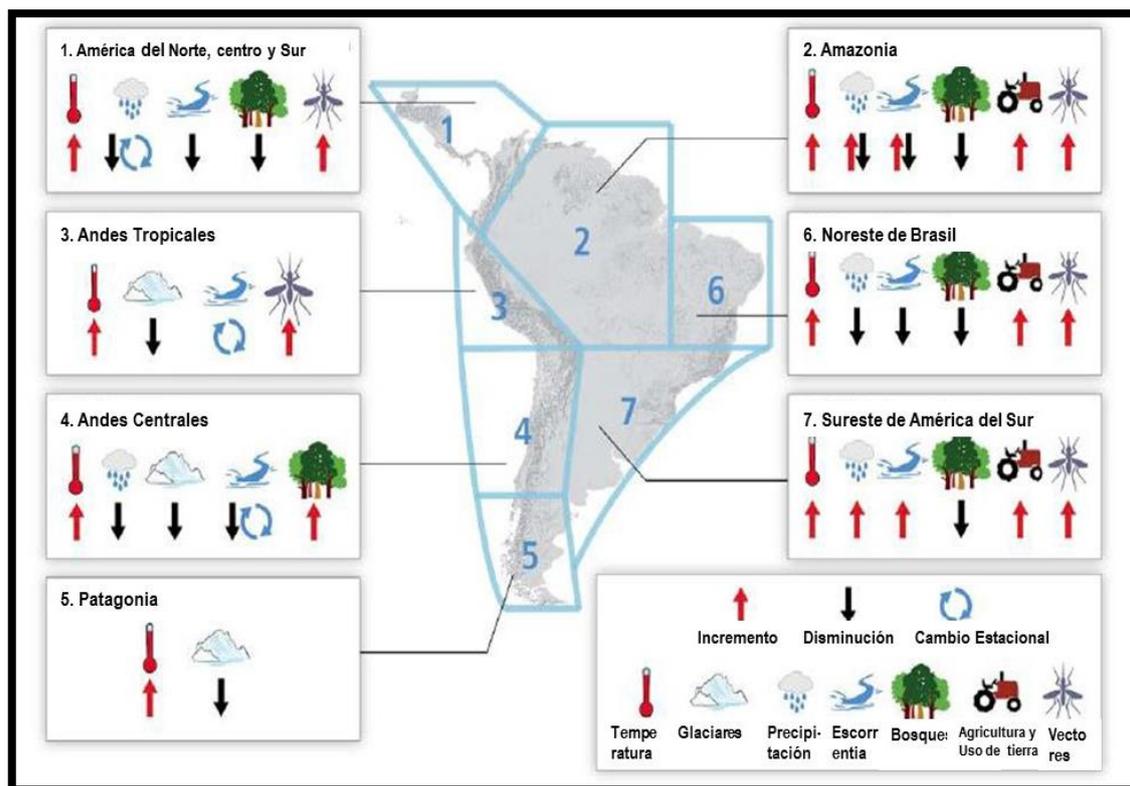


Figura 3.1 Resumen de cambios observados en clima y otros factores ambientales en regiones representativas de América del Norte, América Central y América del Sur, (ADAPTADO de IPCC, 2014).

En la figura 3.1 donde se muestra los impactos del cambio climático en América del Sur, se puede observar que para el caso de Perú, las temperaturas están en incremento continuo, existe un continuo retroceso acelerado de glaciares, el ciclo hidrológico está alterado y se considera un incremento de plagas y enfermedades. En este sentido, frente a estos impactos, es importante basar la metodología en uso de tecnologías de forma que permita al tomador de decisión actuar de forma oportuna, por lo que el aspecto tecnológico es el segundo factor utilizado para la elaboración del McSAT.

Finalmente el IPCC, elabora los Special Reports, y específicamente el Special Report sobre Managing the Risk of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, publicado en 2014 y el Global Warming of 1.5°C publicado el 2018, resaltan que la Gestión de Riesgos es un factor importante en los procesos de gestión de los impactos del cambio climático, como se muestra en la figura 3.2. En este sentido, este insumo, la intervención humana se convierte en el tercer factor necesario para la elaboración de la propuesta del McSAT.

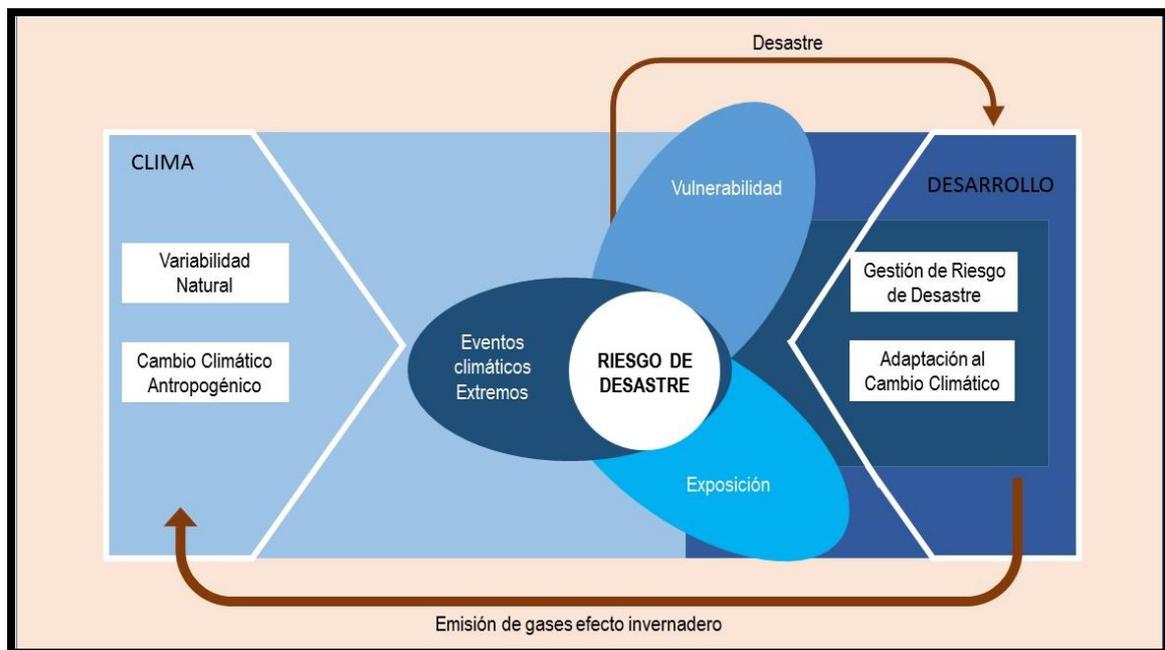


Figura 3.2 Relación entre el Cambio Climático y la Gestión de Riesgos (ADAPTADO de IPCC-SREX, 2011)

En la figura 3.2 se observa que el riesgo de desastre es producto de la relación entre la exposición, la vulnerabilidad y los eventos extremos climáticos, en ese sentido, ésta relación se considera a nivel de la población, es decir la dimensión humana, pues es cuando esta es afectada que los impactos requieren ser gestionados, por lo que bajo este contexto, como mencionado anteriormente, la dimensión humana, vista como aspecto social es un factor a ser considerado como importante en la elaboración del Modelo conceptual en este trabajo de investigación.

El modelo conceptual propuesto, tiene la finalidad de atender los tres factores identificados a raíz de los procesos e impactos a escala global, regional y local que viene ocurriendo en el país. Considerando para ello que a escala global desde la mirada de cambio climático,

hay cinco motivos de preocupación sobre los impactos y los riesgos claves en todos los sectores y regiones (IPCC, 2018), relacionados con las personas, las economías y los ecosistemas, los que se resumen en:

- El Reason For Concern (RFC) 1, sistemas únicos y amenazados: sistemas ecológicos y humanos que tiene rangos geográficos restringidos por las condiciones relacionadas con el clima y tiene un alto endemismo u otras propiedades distintivas. Los ejemplos incluyen los arrecifes de coral, el Ártico y sus pueblos indígenas, las glaciares de montaña y los críticos de biodiversidad.
- Reason For Concern (RFC) 2 Eventos climáticos extremos: riesgos / impactos para la salud humana, medios de vida, activos y ecosistemas de eventos climáticos extremos, tales como olas de calor, lluvias intensas, sequías e incendios forestales asociados, e inundaciones costeras.
- Reason For Concern (RFC) 3 Distribución de impactos: riesgos / impactos que afectan de manera desproporcionada a grupos particulares debido a la distribución desigual de los peligros del cambio climático físico, la exposición o la vulnerabilidad.
- Reason For Concern (RFC) 4 Impactos globales agregados: daño monetario global, degradación a escala global y pérdida de ecosistemas y biodiversidad.
- Reason For Concern RFC5 Eventos singulares a gran escala: son cambios relativamente grandes, abruptos y, a veces, irreversibles en los sistemas causados por el calentamiento global. Los ejemplos incluyen la desintegración de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida.

3.1.1 Componentes del Modelo Conceptual para implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT

El Modelo Conceptual para implementación de Sistemas de Alerta Temprana- McSAT, responde a la situación actual del cambio climático reflejado en sus impactos, resumida en alteración de la ocurrencia de eventos extremos climáticos, en periodicidad, frecuencia e intensidad. El Modelo Conceptual para Sistemas de Alerta Temprana, McSAT, planteado, considera como fundamento los avances científicos existentes, la facilidad de acceso y desarrollo de tecnología y la participación necesaria de la población. Planteando de esta forma tres componentes necesarios para la implementación del McSAT: 1. Componente Científico, 2. Componente Tecnológico y 3. Componente Social

3.1.1.1 Componente Científico

En este componente el McSAT propone que antes de la implementación de un Sistema de Alerta Temprana sean analizadas desde el punto de vista científico lo relacionado a la identificación del problema científico relacionado con el riesgo. En ese sentido, este componente requiere:

- Identificación de la zona de estudio, características físicas, topográficas, el área debe ser a escala local, se recomienda a escala de cuencas.
- Análisis climático de las variables más relacionadas con el riesgo, con variación espacial y temporal que permitan identificar los extremos espaciales y temporales, así como anomalías temporales y espaciales.
- Implementación de un Modelo Numérico de Pronóstico de Tiempo, a alta resolución, con la respectiva determinación de los errores de pronóstico.
- Identificación de los puntos de monitoreo.

3.1.1.2 Componente Tecnológico

En este componente, se resalta la necesidad de establecer una red de monitoreo que proporcione información en tiempo real, con características de permanente y continuo, y que atienda la necesidad del usuario garantizando la utilidad y uso de la información. Este componente requiere:

- Un sistema de monitoreo climático que garantice las mediciones de forma continua y permanente en la orden de segundos.
- Un sistema de comunicación robusto que garantice el acceso de la información desde zonas remotas y viceversa, en tiempo real.
- Una plataforma que permita al usuario vulnerable, la facilidad de entendimiento y uso de la información.
- Desarrollo de tecnología de punta para monitoreo, almacenamiento y transmisión de información en los lugares vulnerables.

3.1.1.3 Componente Social

Este componente, es el que permite la sostenibilidad de un Sistema de Alerta Temprana, involucra a la población desde sus autoridades locales hasta el poblador a pie, en ese sentido se requiere:

- Involucramiento de las autoridades, Nacionales, Regionales y Locales
- Capacitación a escala local de la población sobre el uso e importancia de la información.
- Organización de la población frente a la emisión de información anticipada proveniente del SAT.
- Definición de roles y responsabilidades frente a la ocurrencia de un evento extremo que ocasiona un riesgo.

3.1.2 Características del Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana- McSAT

El Modelo conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT por lo descrito en sus componentes, considera aspectos esenciales que garanticen el funcionamiento y sostenibilidad del Sistema de Alerta Temprana, que sustente la determinación del riesgo, que garanticen la generación de información útil de forma continua en tiempo presente y que permita la generación de una base de datos histórica, en ese sentido las características son: 1. Específicos, 2. Únicos, 3. Tiempo Real, y 4. Monitoreo, los que se describen a continuación.

3.1.2.1 Específicos: Un sistema de Alerta Temprana debe atender un riesgo, fin, objetivo específico, a pesar de que una misma variable climática puede ocasionar multirriesgos, el Sistema de Alerta Temprana debe ser implementado para un riesgo específico, pues se corre el riesgo de no visualizar el riesgo posterior o acumulado. Significa que los Sistemas de Alerta Temprana, deben atender a un fin, objetivo o un riesgo, a pesar que la variable climática puede ser causante de varios peligros o riesgos asociados con fines de Prevención es importante focalizar el riesgo a ser atendido.

3.1.2.2 Únicos: Por la característica de ser específicos, un Sistema de Alerta Temprana en temas de uso de sensores, instalación, sistemas de comunicación, acceso, uso de información principalmente responde de forma única al riesgo, pues el mismo tipo de variable climática o evento extremos climático puede afectar de diferente forma a poblaciones diferentes. A pesar que los Sistemas de Alerta Temprana atienden a riesgos, los que podrían ocurrir en diferentes regiones, estos no pueden ser replicables, pues las características locales son particulares para cada zona y los tiempos de alerta e intensidad de los eventos ocasionan impactos diferenciados.

3.1.2.3 Tiempo Real: Considerando que un Sistema de Alerta Temprana generará información con anticipación a que será utilizada por la población, es importante que el sistema de monitoreo genere información en tiempo real que permita que la población corrobore la ocurrencia del evento o riesgo, con la finalidad de garantizar la sostenibilidad.

El tiempo real se determina en función al uso de la información y a la tecnología utilizada. Todo sistema de alerta Temprana, debe enviar información en tiempo real, la que facilita el seguimiento por la población de los avisos anticipados, incrementando de esta forma la credibilidad y facilitando el empoderamiento y sensibilización de parte de la población, además en muchos casos, dependiendo del riesgo, el tiempo real debe ser en la orden de segundos. Sistema de monitoreo debe ser establecido como permanente y continuo es la única forma de incrementar los niveles de acierto de los avisos de prevención, además debe estar implementado de forma que facilite el acceso a la información del poblador y del tomador de decisión.

3.1.2.4 Monitoreo: Esta característica responde a que un Sistema de Alerta Temprana debe generar información de forma continua y permanente, garantizando de esta forma por un lado la generación de una base de datos para mejorar el conocimiento del riesgo y por otro lado para la mejora de los pronósticos elaborados.

3.2 Aplicación del Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana para Eventos Extremos fríos en el Perú

El Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana-McSAT, fue realizada para zonas altoandinas, el Centro Poblado de Imata, localizado en el Distrito de Santiago de Chuca, Provincia de Caylloma, en la región de Arequipa. Tal como se muestra en la figura 3.3

El Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana, propuesto debe ser aplicado considerando los componentes y características presentadas y descritas anteriormente. Imata es un centro poblado que de forma recurrente ha sido afectada por eventos extremos fríos, heladas, granizadas, lluvia sólida y la población depende de la producción local que es principalmente ganadera.



Figura 3.3. Localización de la zona de Implementación del Modelo conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana. (a) En el Perú, (b) En la región Arequipa, (c) Vista del centro poblado de Imata

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados principales son el Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT y su aplicación. El Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta temprana –McSAT, se sustenta en sus componentes y características para la determinación del riesgo, la selección de sensores y la emisión de la alerta. La aplicación del Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT para fines de validación.

4.1 Resultado 1: El Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta temprana –McSAT Se muestra en la figura 4.1. la representación gráfica del Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta temprana –McSAT, donde se observa la integración y sinergia de los componentes, científico, tecnológico y social los que considerando las características del Modelo propuesto deben considerar la generación de información de forma continua, permanente y cíclica, por un lado para fines de prevención proporcionando calidad de vida y por otro lado, generar información en la escala temporal que sea requerida para la toma de acciones de un frente a la ocurrencia de un riesgo y la consideración de los impactos.

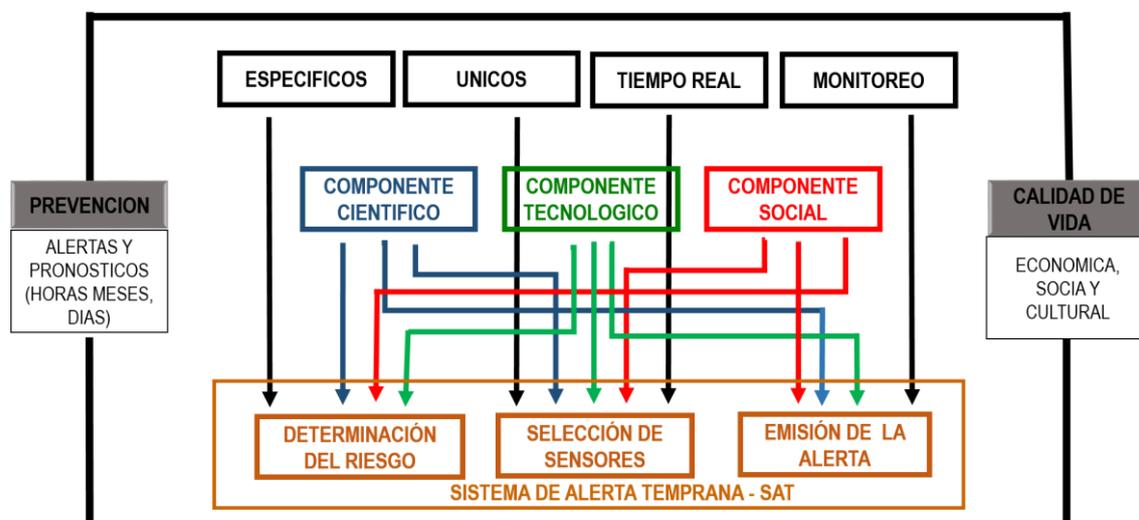


Figura 4.1 Representación gráfica del Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana (FUENTE: Elaboración propia)

En la figura 4.1, donde se representa gráficamente el Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT, donde se observa que los componente científico, tecnológico y social aportan al Sistema de Alerta Temprana conformado por: La Determinación del riesgo, cuya fundamento es obtener la información con sustento científico del riesgo que se quiere alertar; la Selección de sensores que es el conjunto de sensores para el monitoreo en tiempo real de la variable climática que identifica y se relaciona con el riesgo determinado; y la Emisión de la Alerta es el procedimiento, proceso de que la información generada llegue a la población y/o tomadores de decisión.

4.1.1 Para la Determinación del Riesgo: Según el Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana - McSAT, tiene una relación directa con el componente Científico, en ese sentido para su determinación se sugiere la estructura de la figura 4.2



Figura 4.2 Estructura para la Determinación del Riesgo en la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana (FUENTE: Elaboración propia)

En la Figura 4.2 se observa que para la determinación del riesgo depende principalmente del componente científico, representado en el gráfico por el color azul, mostrando que cualquier actividad, acción, proceso, estudio o resultado, relacionado a la determinación del riesgo debe tener carácter científico, en sustento, metodología y/o interpretación. Al mismo tiempo, se observa el círculo rojo, con lo cual se plantea que debe existir una estrecha relación con el componente social, considerando el concepto de que la ciencia es para resolver problemas de la sociedad, e modelo resalta que a cada paso desarrollado y/o ejecutado por el componente científico, debe establecerse estrategias de forma que la población y/o el tomador de decisión se familiaricen con los resultados de forma continua, considerando que la ciencia resuelve los problemas que afectan o vulneran a la sociedad. El componente social en ese sentido acompaña de forma directa estableciendo, diseñando o desarrollando estrategias o metodologías necesarias para la sinergia entre el componente científico y social, a través de la interpretación de los resultados científicos y la relación con las necesidades de la población. El círculo en verde, que representa el componente tecnológico, se plantea como una herramienta que proporciona resultados objetivos y concretos de la sinergia entre componente científico y social, además de levantar insumos para la siguiente fase relacionada con la selección de sensores.

En la determinación del Riesgo, debe considerar, interpretación física, uso de la estadística como herramienta para tratamiento de información, Modelamiento numérico para proyección futura y difusión y divulgación. Todos los procesos relacionados con el riesgo deben tener carácter de análisis físico y dinámico, desde la selección de variables hasta el entendimiento del riesgo, para esto se debe considerar el análisis temporal que considere el pasado, futuro y presente. En la determinación del Riesgo la estadística es una herramienta esencial y su interpretación es de carácter físico. La Determinación del Riesgo concluye en la elaboración de pronósticos, es decir comportamientos a futuro de la variable seleccionado o del riesgo, lo que implica el uso de modelamiento numérico como herramienta necesaria. Finalmente considerando que los riesgos afectan directamente a la población es importante que se considere una presentación de los resultados a l población de forma clara y aplicada a sus necesidades, divulgación científica, que permita la toma de decisión.

4.1.2 Para la Selección de Sensores: Según el Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT (figura 4.1), la selección de los sensores de monitoreo, representado por el color verde, están directamente relacionados con el componente tecnológico, pero que no descarta la intervención del componente científico (color azul) y el componente social (color rojo) como se puede observar en la figura 4.3.



Figura 4.3. Selección de Sensores en la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana
(FUENTE: Elaboración propia)

La Selección de sensores, debe considerar principalmente las características del Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana –McSAT, tomando de base a la información generada por el componente científico en la determinación del riesgo, variable o riesgo. La Selección de sensores, debe considerar además de tecnología de punta, la generación de y desarrollo tecnológico en el lugar o población donde se implementaría el Sistema de Alerta Temprana.

La Selección de sensores, como planteado, está directamente relacionado con el componente social, lo que significa que cada acción para la selección de sensores debe ser de conocimiento de la población, implica conocer la necesidad de energía, instalación, seguridad, impactos, entre otros, así como promover la participación directa de la población de forma a empoderarse y sentirse parte, por lo que el componente social, diseñará, elaborará estrategias para el conocimiento, acompañamiento y aceptación de la población y/o tomadores de decisión. Así mismo considerando que este componente es netamente tecnológico el componente social basa su sinergia en la búsqueda de estrategias a fin de garantizar la sostenibilidad y seguridad de los equipos tecnológicos encargados de la generación de información en tiempo real, como parte del Sistema de Alerta Temprana.

En la Selección de los sensores, liderado por el componente tecnológico, debe estar acompañado por el componente científico considerando que la información generada retroalimentará los procesos de la determinación del riesgo y sustentará la emisión de la alerta, la que por ser un aspecto dinámico y físico puede ser alterado a través del tiempo y sólo la información insitu garantizará y permitirá su actualización.

4.1.3 Para la Emisión de la Alerta: Según el Modelo Conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT, está a cargo del componente social, y para eso se propone el esquema de la figura 4.4.



Figura 4.4 Emisión de la Alerta del Sistema de Alerta Temprana (FUENTE: Elaboración propia)

La Emisión de la Alerta, si bien es el resultado final del Sistema de Alerta Temprana, es resultado de un proceso secuencial de acciones focalizadas en sensibilización, empoderamiento y capacitación de la población por un lado para garantizar el uso y la utilidad de la información generada por el Sistema de Alerta Temprana y por otro lado generando credibilidad de la información utilizando en la toma de decisiones.

El proceso de la Emisión de la Alerta, si bien corresponde a un proceso secuencial de actividades diseñadas de acuerdo al desarrollo del componente científico y tecnológico debe basar su estrategias con el estrecho acompañamiento de los componentes científico y

tecnológico, garantizando de esta forma que los resultados están llegando de forma adecuada. El componente social es el encargado de la difusión de los resultados de forma que garantice el uso de la información en la toma de decisiones de la población y de sus autoridades y valide bajo sus estrategias de difusión el conocimiento científico y el desarrollo tecnológico generados en el proceso de implementación del Sistema de Alerta Temprana.

4.2 Resultado 2: Aplicación del Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta temprana –McSAT para el caso de eventos extremos fríos:

El Modelo conceptual para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT, fue utilizado en las zonas altas de Arequipa, Provincia de Caylloma, Distrito de Santiago de Chuca, Centro Poblado de Imata. Aplicando el Modelo conceptual para Implementación de Sistemas de Alerta Temprana, se presentan los siguientes resultados:

4.2.1 Respecto a la Determinación del Riesgo: Considerando que debe ser realizado por el componente Científico, con la participación estrecha del componente social, se definió un primer taller para conocer el sentir y problemática de la población y cuyo foco se basó en responder preguntas claves determinadas para los fines de este estudio, siendo las siguientes definidas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Preguntas claves que relacionan el componente científico y el social

PREGUNTA	RESPUESTA
¿Qué es lo que más les afecta respecto al clima a la población?	Lluvia y Frío
¿Entre el frío y la lluvia que es lo que más les afecta?	Frío
¿Pueden especificar si es nevada, helada, granizada?	helada, granizada, Nevada
¿Qué tipo de actividades son las más afectadas?	El pastoreo y la salud
¿Quiénes son los más afectados frente al clima?	Nuestro ganado y los niños
¿Ustedes saben qué hacer cuando ocurre ese evento?	Si, solo que no sabemos cuándo ocurrirá, todo ha cambiado
¿Les interesaría saber con anticipación sobre cuándo ocurrirá frío?	Claro, porque así no saldríamos con nuestro ganado
¿Con cuánto tiempo de anticipación les interesaría saber sobre la ocurrencia del evento?	Nosotros llevamos al ganado durante días a pastorear

Basada en estas respuestas, se define que el riesgo a atender son los **extremos fríos relacionados con nevada, helada, granizada y bajas de temperatura**, que afecta la actividad ganadera y les gustaría una anticipación de días.

- **Verificación de la intensidad de la Temperaturas Mínimas:** En función a los resultados del componente social y las preguntas previas la definición del riesgo se relaciona que está en función a la temperatura mínima, para ellos mediante un análisis climático, como se presenta en la figura 4.1, para una distribución temporal diaria durante más de 40 años, observándose que las temperaturas mínimas en la región en rangos entre -20°C a -30°C durante los meses de junio, julio y agosto y próximas a los 0°C durante los meses más cálidos. Lo que comprueba lo mencionado por la población.

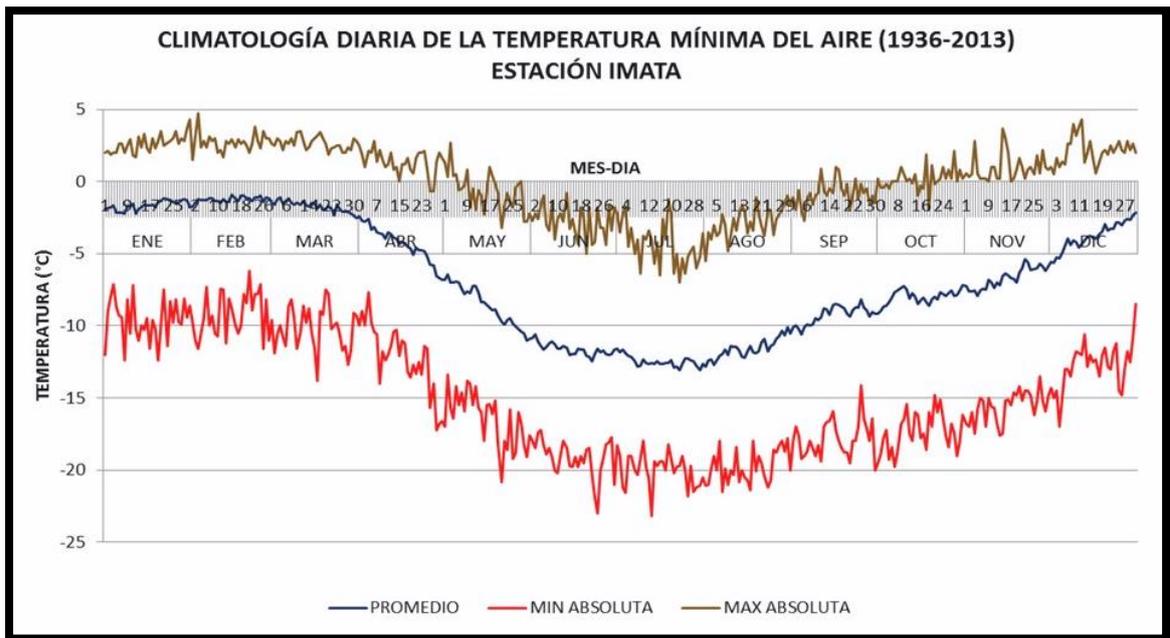


Figura 4.5 Comportamiento climático de la Temperatura Mínima del Aire en Imata durante 1936 a 2013. (FUENTE: Elaboración propia, FUENTE DE DATOS: SENAMHI).

En la figura 4.6 se observa la climatología para la estación de Caylloma basada en una serie temporal diaria de 77 años, proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, donde se puede verificar que las temperaturas mínimas no son tan bajas como en Imata.

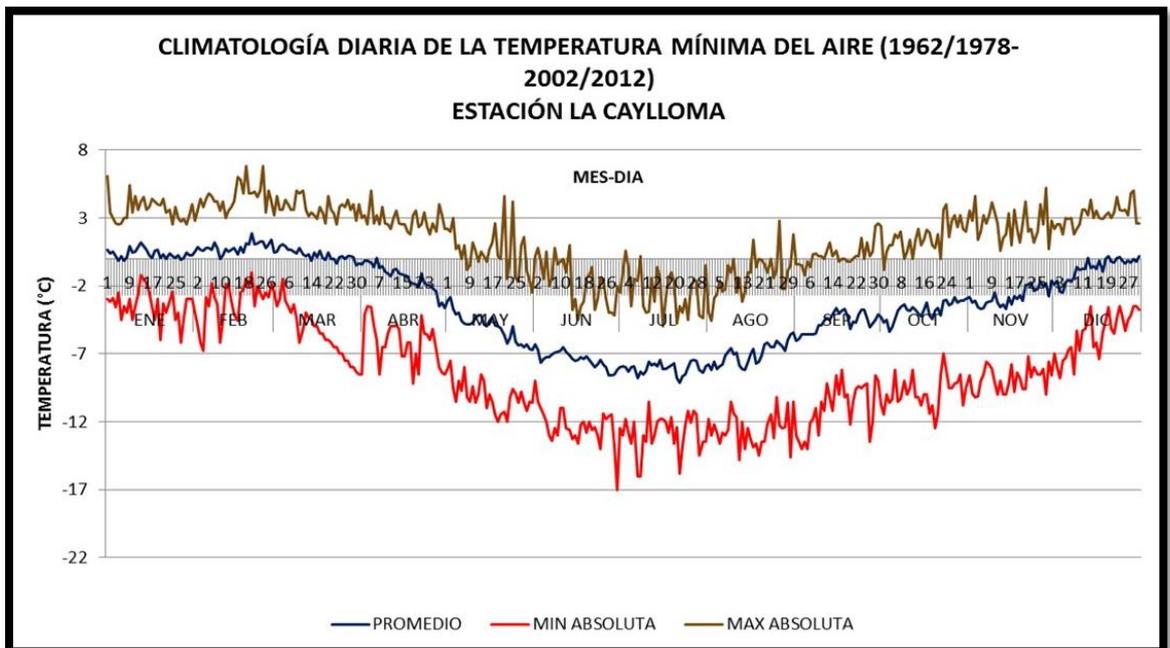


Figura 4.6 Comportamiento climático de la Temperatura Mínima del Aire en Caylloma durante 1936 a 2013. (FUENTE: Elaboración propia, FUENTE DE DATOS: SENAMHI)

Se realizaron asimismo análisis de la variación multianual de la Temperatura Mínima Media Mensual para todos los meses del año, utilizando la data de los 77 años. Se presenta en la figura 4.7 la Variación Multianual de la Temperatura Mínima Media Mensual de la estación de Imata para el mes de enero y en la figura 4.6 la Variación Multianual de la Temperatura Mínima Media mensual para el mes de julio.

Se observa en la figura 4.7 que durante los meses de verano los periodos de frio expresados por la temperatura mínima son continuos, mientras que en los meses de invierno, como se observa en la figura 4.8, para el mes de julio existen incrementos de Temperatura Mínima de forma cíclica. Estos análisis son indicadores de recurrencia del evento extremo frio.

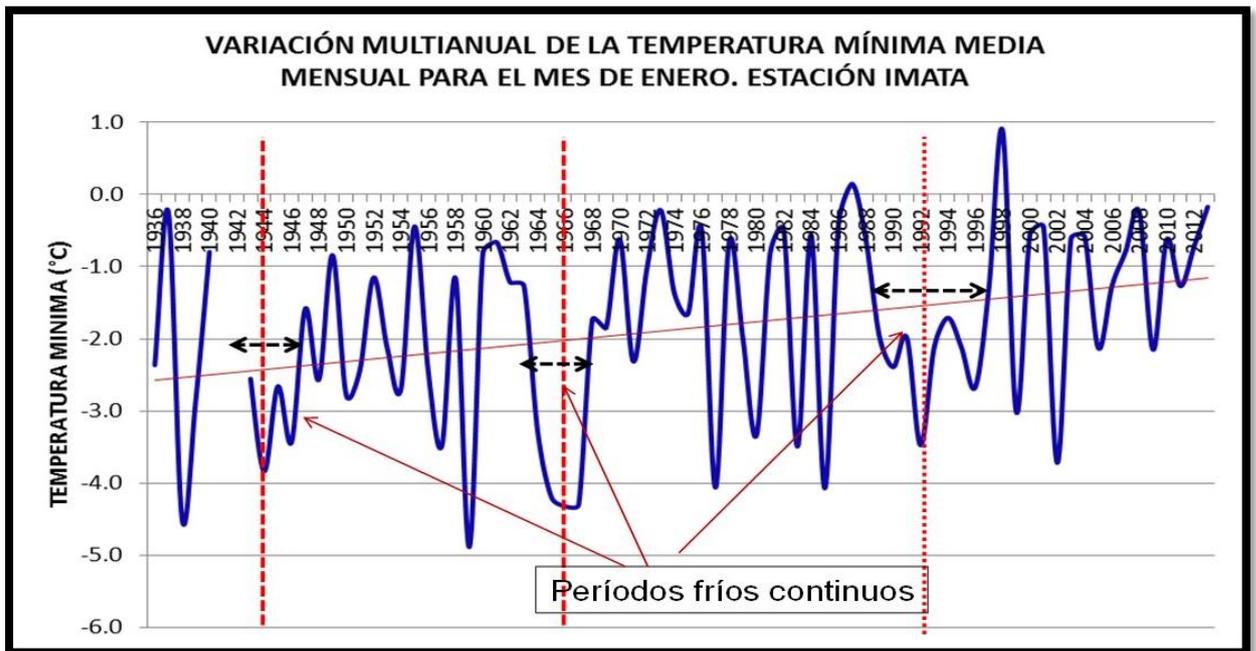


Figura 4.7 Variación Multianual de la Temperatura Mínima media mensual en Imata para el mes de enero.

(FUENTE: Elaboración propia, FUENTE DE DATOS: SENAMHI)

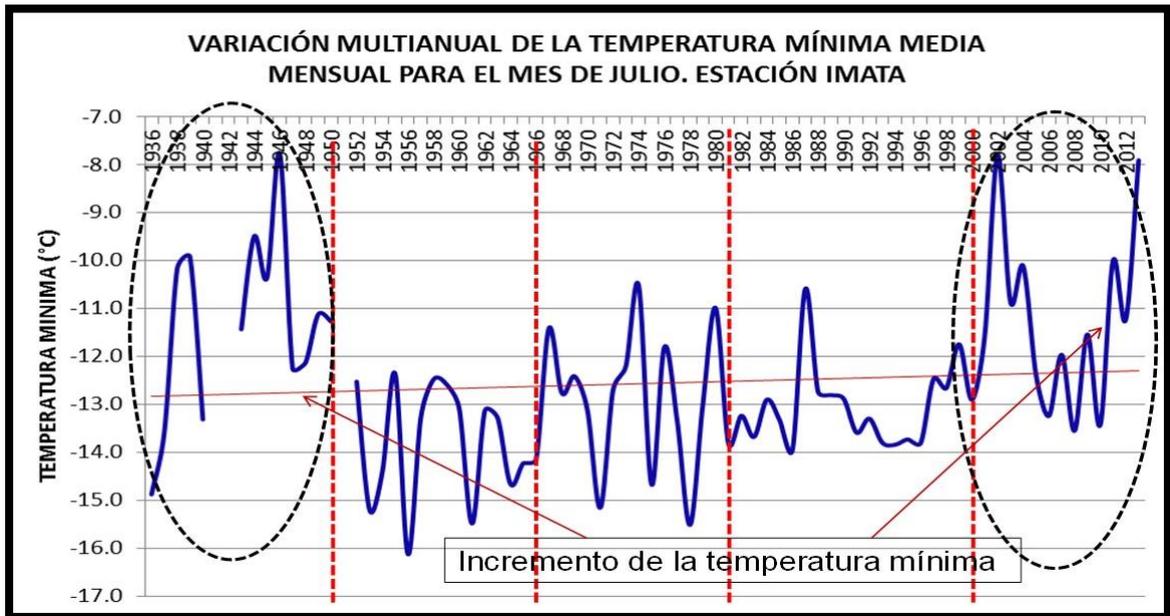


Figura 4.8 Variación Multianual de la Temperatura Mínima media mensual en Imata para el mes de julio.
(FUENTE: Elaboración propia, FUENTE DE DATOS: SENAMHI)

Se puede observar que los eventos extremos fríos identificados durante el mes de julio durante los 77 años tienen una periodicidad e intensidad bien definidas.

- **Elaboración de los pronósticos:** Considerando que el análisis climático fue realizada con una variación diaria, los pronósticos fueron elaborado con variación diaria con una anticipación de un mes por un periodo para ser ajustado a cada 15 posteriormente con la finalidad de incrementar la precisión. En la figura 4.2 se puede observar que los pronósticos fueron realizados a escala diaria, se muestran los pronósticos para la estación de Imata, emitidos con una anticipación de 30 días, ajustado a cada 15 días.

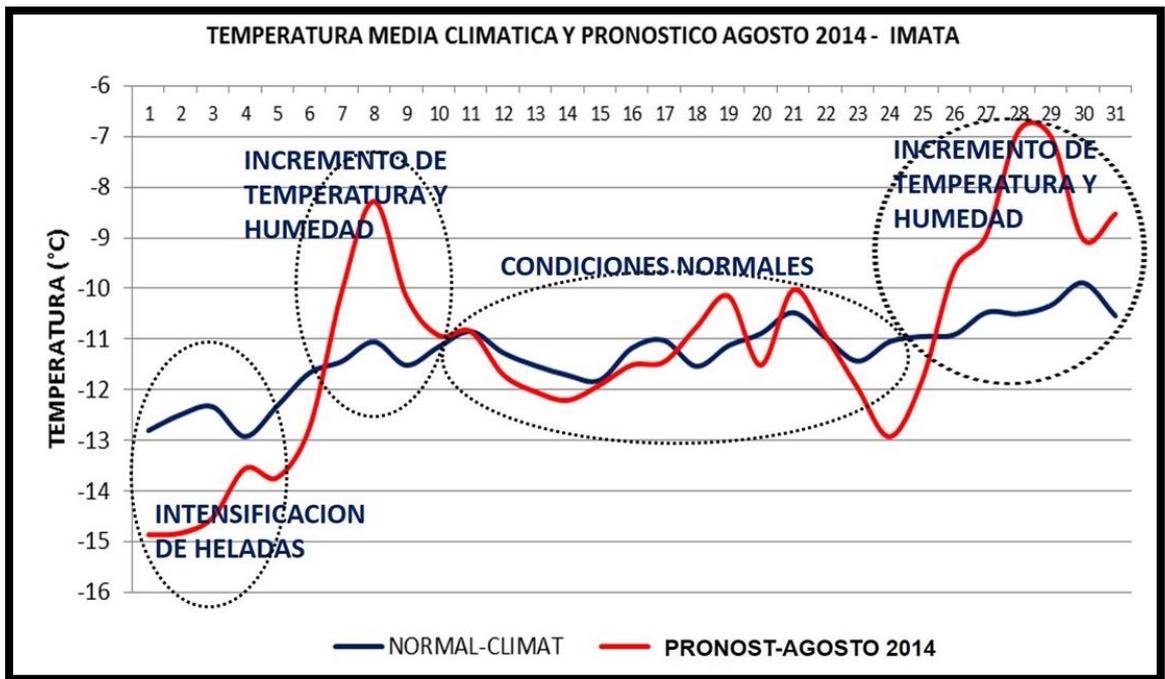


Figura 4.9 Pronóstico mensual a escala diaria de eventos extremos fríos para Imata, válido para del 01 al 31 de Agosto de 2014. (FUENTE: Elaboración propia)

El pronóstico elaborado para el mes de agosto de 2014, fue elaborado el 30 de julio de 2014. Del mismo modo el 31 de Agosto de 2014 se elaboró el pronóstico para el mes de octubre de 2014, el cual se muestra en la figura 4.9.

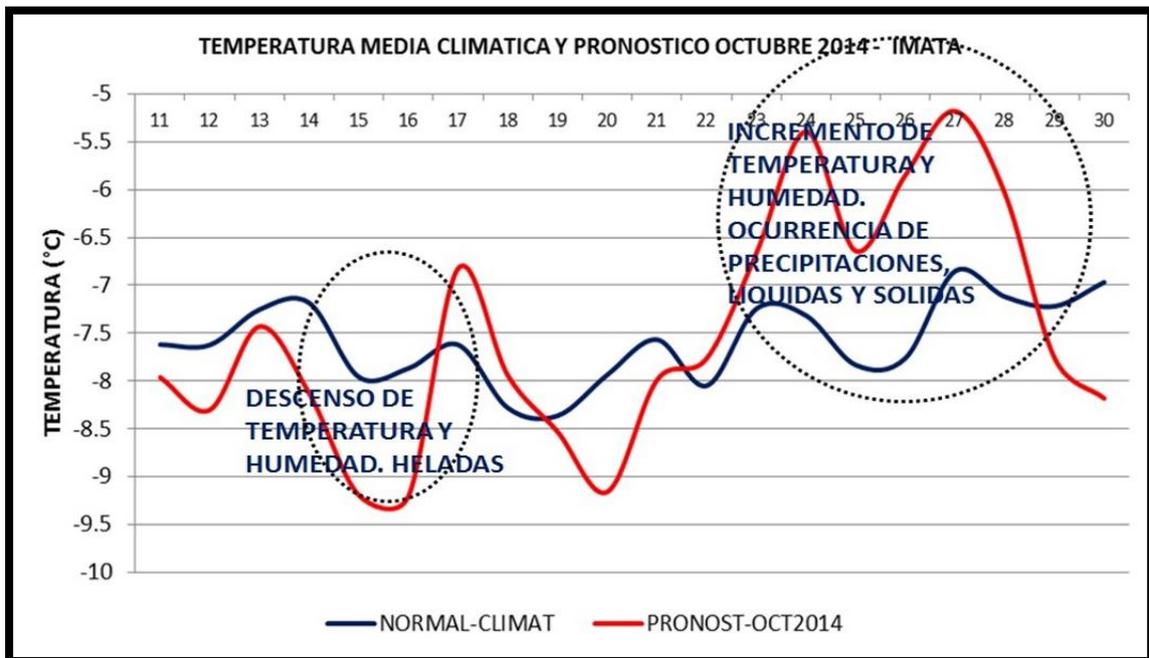


Figura 4.10 Pronóstico mensual a escala diaria de eventos extremos fríos par Imata, válido del 1 al 30 de octubre de 2014. (FUENTE: Elaboración propia)

En los pronósticos para fácil entendimiento de la población se ha considerado resaltar los periodos de ocurrencia de eventos marcantes, tal como se muestra en las figuras 4.9 y 4.10, resaltando incrementos de temperatura, incremento de temperatura, humedad, ocurrencia de heladas, entre otros de forma que el pronóstico sea de fácil entendimiento de la población que va a utilizar. En la figuras 4.9 y 4.10 se muestra que los pronosticos fueron elaborados con validez para 30 días, siendo elaborado y emitido el último día del mes precedente.

- **Validación de pronósticos:** Considerando que los pronóstico generados deben ser utilizados por la población para tomar acciones frente a la ocurrencia de los eventos fríos, este componente tuvo que validar sus pronósticos de forma que se proporcione el porcentaje de acierto y por tanto la credibilidad de parte de la población. Se presentan en las figuras 4.10 y 4.11 se muestra la comparación entre los rangos superior e inferiores del pronostico de Temperatura Minima comparado con el valor observado de la Temperatuda Minima, para los meses de julio y agosto respectivamente. Es importante mencionar que como los pronósticos fueron elaborado durante el periodo del proyecto ésta análisis fuer realizado del mismo modo durante el mismo periodo.

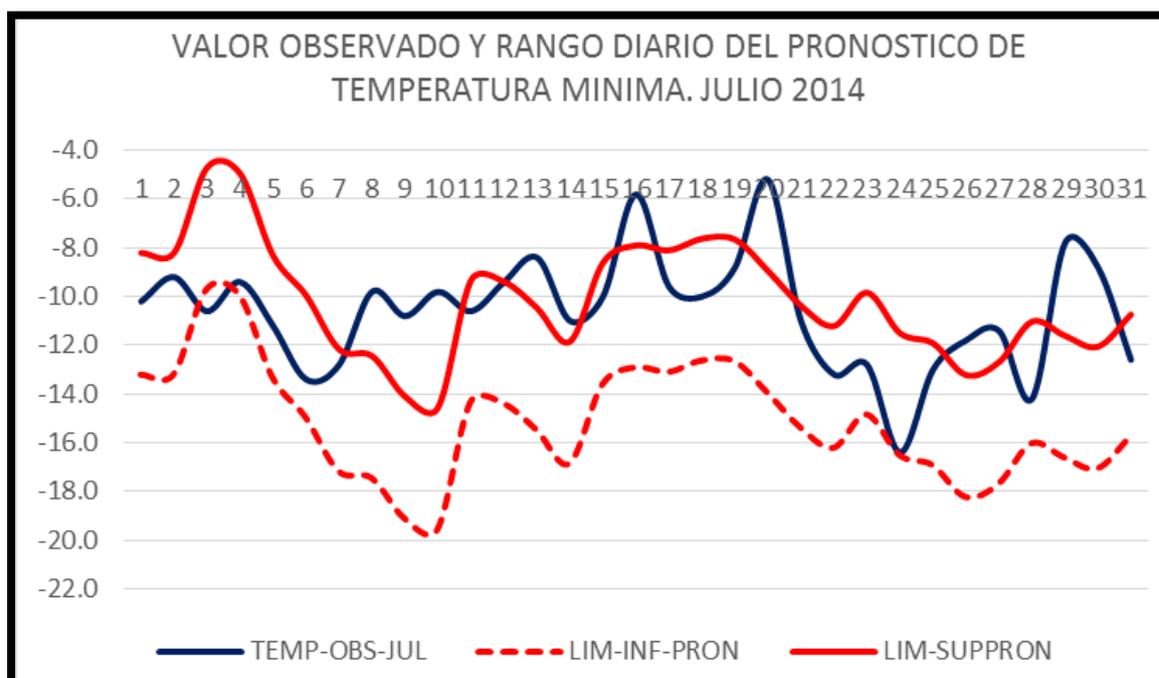


Figura 4.11 Valor observado y rango diario del pronóstico para Imata, correspondiente al mes de julio de 2014. (FUENTE: Elaboración propia)

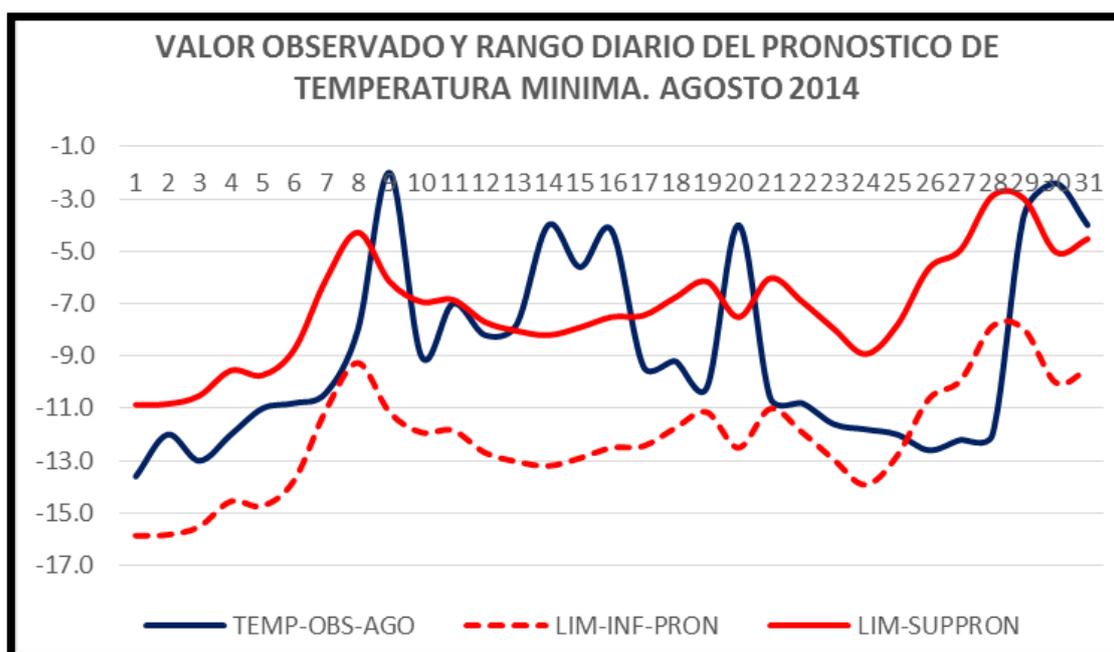


Figura 4.12 Valor observado y rango diario del pronóstico para Imata correspondientes al mes de agosto de 2014. (FUENTE: Elaboración propia)

Los indicadores de nivel de acierto de los pronósticos son medidos con diversos indicadores estadísticos, en el caso de este estudio, se realizó una comparación porcentual de números de aciertos en relación al total, lo cual se muestra en la tabla 4.2

Tabla 4.2 Porcentaje de acierto de los pronósticos por meses.

VERIFICACIÓN	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	ENE.
Aciertos	25	19	20	13	13	21	24
Total	30	31	31	30	29	30	31
% Acierto	83	61	65	43	45	70	77

Para estos meses, el porcentaje de acierto de los pronósticos sería superior al 70 por ciento, lo cual para la credibilidad de ocurrencia en un evento extremo es adecuado y por lo tanto garantiza el dar a conocer a la población.

4.2.2 Respecto a la selección de Sensores: La selección de sensores es realizado por el componente Tecnológico, como establecido en el Modelo conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT. En ese sentido los parámetros evaluados en este estudio aplicado fueron los que se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Indicadores para la implementación de componente tecnológico

PREGUNTAS	RESPUESTAS
La distancia entre el local del Municipio y los puntos de estación	15 km.
El Sistema de energía a ser utilizada para cada punto de monitoreo	Energía Solar
El Sistema de almacenamiento en cada punto de monitoreo	Multisensor
El tipo de estación a ser utilizada	Climática, tiempo de vida útil mayor a 5 años
La frecuencia de transmisión de la información	Segundos en tiempo real
La Visualización de la Información	De acuerdo a requerimiento del Alcalde
Sistema de Seguridad de cada punto de monitoreo	Cámaras
El uso de la Información	Interpretación

En este sentido, atendiendo a esta incógnitas se determinó utilizar como **sistemas de comunicación antenas de radio-frecuencia, alimentadas por energía solar y estaciones climáticas robustas, con transmisión de la información en la orden de segundos**, y desarrollo de un sistema de **almacenamiento propio para cada estación**, toda la información sería visualizada en un computador localizado en el municipio, donde se **desarrollaría un software de acuerdo a los requerimientos del usuario**, utilizando para ello el software libre. Los resultados obtenidos fueron:

- **Localización de la Estaciones de Monitoreo:** Los puntos localizados como puntos de monitoreo, fueron seleccionados de forma que cubriera la zona de estudio y en

función al alcance del sistema de comunicación que en este caso fueron antes de radio frecuencia, con un alcance de 30Km y alimentados con energía solar. En la figura 4.13 se muestra la localización de las estaciones de monitoreo, 4 estaciones las que fueron definidas en forma conjunta con el componente científico.

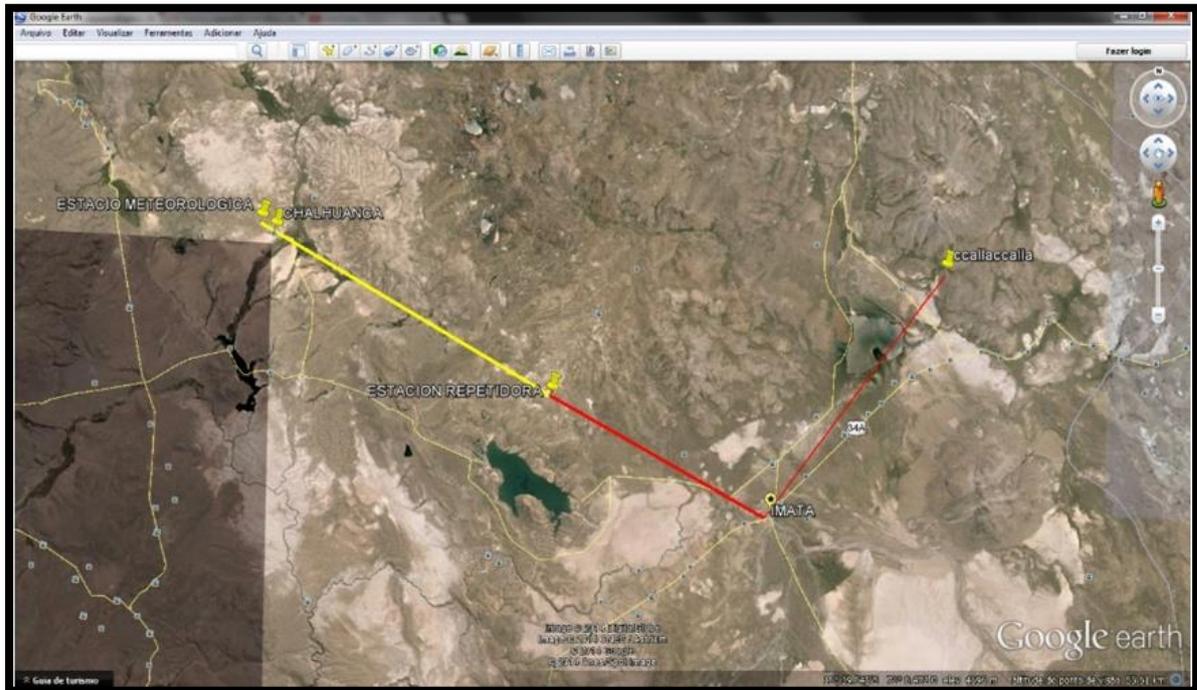


Figura 4.13 Red de estaciones climáticas de Monitoreo. (FUENTE: Elaboración propia)

Este diseño, considera que la información obtenida de cada una de las estaciones es recibida y almacenada en tiempo real en un solo punto en este caso localizado en Imata, en tiempo real, esta información al mismo tiempo es almacenada en cada uno de los puntos de monitoreo.

- **Instalación y Sistema de energía:** Las estaciones fueron instaladas con sistema de energía proveniente de paneles solares con autonomía de para 10 días, tanto para el sistema de comunicación como para la estación climática. Se observa en la figura 4.5 la red de estaciones instaladas para el monitoreo.

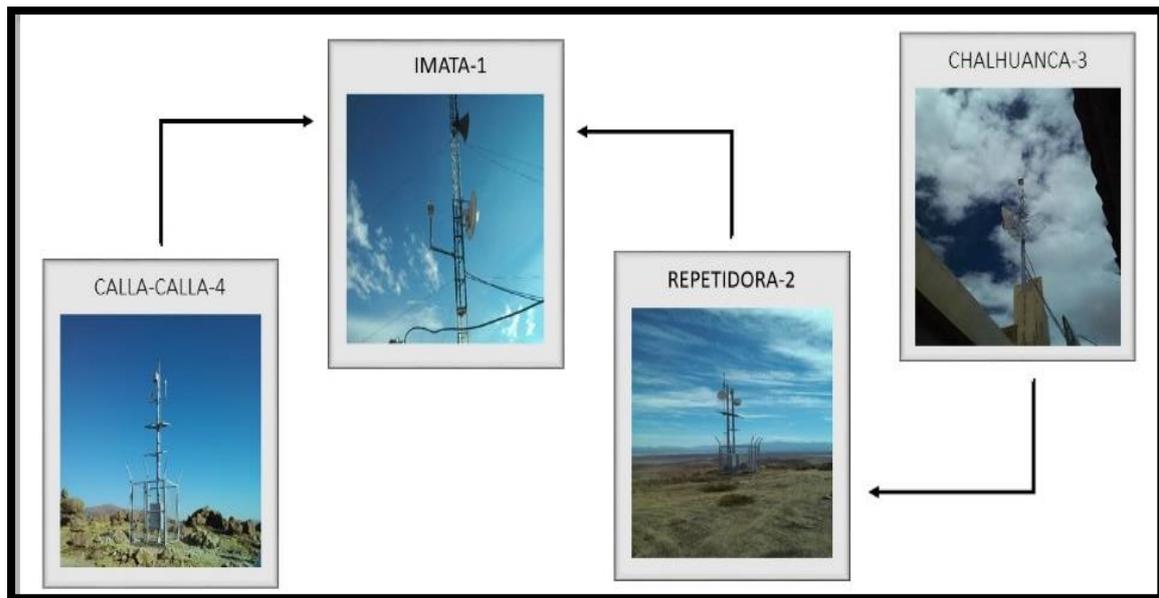


Figura 4.14 red de estaciones instaladas para el Sistema de Alerta Temprana. (FUENTE: Elaboración propia)

En la figura 4.14 se observa que cada una de las estaciones tiene un nombre, es importante resaltar que los nombres fueron generados en concordancia con la población. Se observa en la estación de Calla-Calla-4 como en la estación Repetidora-2 que el cerco de protección es diseñado de acuerdo al lugar de instalación. En el caso de la estación Imata-1, se puede observar el sistema de comunicación instalado, es decir la antena de radio-frecuencia que está apuntando a la estación de Chalhuanca. La secuencia es debido a que todas ellas deben enviar la información a la estación Imata, donde se encuentra el servidor central para procesamiento de datos.

- **Sistema de almacenamiento y difusión de Información:** El sistema de almacenamiento, fue diseñada por el componente tecnológico, se diseñó un datalogger propio con la finalidad de garantizar el tratamiento de la información proveniente de las estaciones de forma que sea entendida por la población. En ese sentido se desarrolló una plataforma en software libre diseñada para la fácil comprensión de la población la fue instalada en un computador instalado en el municipio de la localidad de Imata, considerando que el Alcalde es el responsable de la gestión de Riesgos a escala local. En la figura 4.12 se observa el software instalado en el servidor central.



Figura 4.15 Servidor central, localizado en el Municipio de Imata

4.2.3 Respecto a la emisión de la Alerta: Como planteado en el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT, sería implementado por el componente Social, en ese sentido considerando que se debe contar con el apoyo y aceptación de la población así como garantizar la sostenibilidad del Sistema de Alerta Temprana, este componente implementó en base a los resultados obtenidos en el proceso de la determinación del riesgo y la selección de sensores, reuniones participativas, talleres de difusión y capacitación, principalmente los mencionados a continuación:

- **Primer Taller con el Gobierno Regional de Arequipa:** Con la finalidad de presentar la filosofía del Sistema de Alerta Temprana y el proceso de implementación así como la participación de la población, se concluye que contar con un Sistema de Alerta Temprana para conocer la ocurrencia de eventos extremos fríos con anticipación es importante.
- **Segundo Taller de presentación del Proyecto a los Alcaldes de Imata y Santiago de Chuca y población representativa de cada municipio.** Se presenta un conversatorio entre el científico y la población mostrando resultados de la climatología resaltando fechas claves de bajas de temperatura para ser corroborados por la población.
- **Tercer Taller sobre la Implementación del Sistema de Alerta Temprana,** se presenta a la población el proceso de implementación del Sistema de Alerta Temprana y su participación en la mano de obra de la infraestructura.

- **Cuarto Taller sobre la designación de un responsable técnico** en el centro poblado para el Sistema de Alerta Temprana cuya responsabilidad era verificar en el monitor del Computador del Municipio si la información estaba actualizada.
- **Quinto Taller sobre la validación de los pronósticos**, se capacitó al personal técnico y demás invitados de la población sobre la necesidad de generar información observacional sobre la ocurrencia de eventos fríos, cuyos reportes eran enviados vía telefónica durante 3 meses.
- **Sexto Taller, sobre la capacitación del Sistema de Alerta Temprana a la población organizada en tres grupos:** Instituciones (municipio, postas médicas y transportes), Educación (colegios primaria y secundaria, docentes), Población en general, con actividad económica informal y/o formal.
- **Séptimo Taller, sobre el funcionamiento y mantenimiento preventivo del Sistema de Alerta Temprana** a los funcionarios y personal designado por los Municipios.
- **Octavo Taller, sobre la presentación de resultados del funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana** con la participación de la población.



Figura 4.16 Taller de Capacitación sobre Eventos Extremos a estudiantes de secundaria en Imata.



Figura 4.17 Taller de Capacitación en el Centro Poblado de Imata a Colaboradores responsables del Sistema de Alerta Temprana.

El sistema de Alerta Temprana implementado en Imata, funciona con la emisión de pronósticos de la ocurrencia de eventos extremos fríos, relacionados con Nevada, Granizada, baja de temperaturas con 15 días de anticipación, emitiendo información en tiempo real, en la orden de segundos de cada una de las estaciones instaladas, que llegan a un servidor central instalado en el local de la Municipalidad de Imata. El software de visualización en el Servidor Central fue desarrollado con el uso de software libre bajo el requerimiento del Alcalde en aspectos de selección de colores y visualización para mejor comprensión.

4.2.4 Respecto a la instalación del Sistema de Alerta Temprana para Eventos Extremos Fríos aplicando el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana –McSAT: Para la instalación del Sistema de Alerta Temprana, Equipo conformado:

- Investigador Principal. Meteorólogo con grado de doctor especialista en Modelamiento Numérico
- Un Meteorólogo especializado en Clima,
- Un Profesional especializado en la generación de escenarios de cambio climático.
- Un Profesional en electrónica para automatización de procesos,
- Un Profesional para desarrollo en software
- Un Profesional en Electrónica de comunicaciones; y
- Un profesional de ciencias sociales.

El proceso de implementación inicia con la obtención y análisis de resultados climáticos y de modelamiento numérico, se utilizó el Weather for Research Forecasting, resultados que fueron presentados a las autoridades locales con ayuda de la gestión del profesional de la parte social. Previo a la instalación de estaciones climáticas se realizó una visita de campo a la zona, y se pudo identificar la necesidad de la Autoridad de cómo recibir e interpretar la información, y las necesidades de seguridad de la población, concluyéndose la necesidad de diseñar el software de monitoreo, por lo tanto el sistema de almacenamiento, y el diseño de la infraestructura de cada estación, lo que incluiría camarás de vivigilancia, así como el sistema de comunicación mas seguro y confiable, radio frecuencia.

Para la instalación de las estaciones se contó con el apoyo de la población, quienes participaron desde la instalación hasta la validación de los pronósticos y uso de la información en tiempo real.

El Sistema inició su funcionamiento 3 meses después de la primera conversación con la población, los procesos de validación de las alertas fue durante aproximadamente un año en conjunto con la población.

Los costos relacionados a este proyecto han sido principalmente con la compra de las estaciones, y el pago por los servicios de los profesionales lo que no fueron por mas de 3 meses.

V. CONCLUSIONES

Considerando que el presente estudio tiene una visión multidisciplinar, integradora y sinérgica, de aspectos científicos, tecnológicos y sociales, e implementado para un caso real y siendo una contribución a la gestión de riesgos a escala local para el Perú, con fines de prevención, podemos concluir:

1. El Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana-McSAT, tiene un enfoque multidisciplinario, relaciona ciencia geofísicas con desarrollo tecnológico y ciencias sociales.
2. La determinación del Riesgo, basado en el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana-McSAT, se refiere al conocimiento del aspecto climático histórico, desde el pasado al futuro, no sólo evaluando el comportamiento de los eventos extremos climáticos, sino identificando los impactos en las actividades económicas de la localidad de estudio.
3. La Selección de sensores, basado en el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana - McSAT debe garantizar que la emisión de información en tiempo real hasta el tomador de decisión, que debería ser la Autoridad local, lo que involucra desarrollo tecnológico generando de esta forma tecnología de punta para la gestión de riesgos a escala local.
4. La emisión de la Alerta, basado en el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT, se refiere no solamente a la generación de la información que alerte la ocurrencia de un evento extremo, sino también que considere la accesibilidad y utilidad para el tomador de decisión, considerando procesos de automatización y desarrollo de software.

5. Utilizar el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana-MCSAT en la gestión de riesgos relacionado con eventos extremos climáticos en el marco del cambio climático, ha generado niveles de pronóstico con grados de acierto adecuados, permitiendo la gestión adecuada el evento extremo en el Centro Poblado de Imata.

6. El componente social, ha garantizado la aceptación de la Población del Sistema de Alerta implementado en el Centro Poblado de Imata, lo que permitió la instalación y seguridad de los equipos utilizados.

VI. RECOMENDACIONES

Basada en las conclusiones, los resultados y la aplicación del Modelo conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT, en el Perú, frente a la ocurrencia de eventos extremos climáticos recurrentes y frente a los impactos del cambio climático, las principales recomendaciones de este trabajo de investigación son:

1. En relación a la normatividad, en el Perú existe la Guía de Implementación para Sistemas de Alerta Temprana elaborado por el INDECI, se recomienda que el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana-McSAT sea adoptado como base operativa y complementaria de forma que se garantice el sustento científico y evidencia en cada una de las fases de implementación de Sistemas de Alerta Temprana, establecidas en la Guía de INDECI.
2. Considerando la importancia y necesidad de la Gestión de Riesgos en el Perú, y por definición ser una temática de carácter multidisciplinario con enfoque a escala local, se recomienda la creación de una entidad competente en Gestión de Riesgos con visión multidisciplinaria y sinérgica y que integre aspectos científicos, tecnológicos y sociales.
3. Adoptar el Modelo Conceptual para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana – McSAT, como la principal herramienta para la gestión de riesgos climáticos con fines de prevención en el Perú.

VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Acuerdo Nacional. (2014). *Acuerdo Nacional: Consensos para enrumbar al Perú*. 1.^a ed. Exituno S. A., Lima.
2. ANA. (2015). *Plan nacional de recursos hídricos*. Autoridad Nacional del Agua (ANA), Lima.
3. Anderson, E., Marengo, J., Villalba, J., Halloy, S., Young, B., Cordero, D., *et al.* (2012). Consecuencias del cambio climático en los ecosistemas y servicios ecosistémicos de los Andes Tropicales. In: *Cambio climático y biodiversidad en los Andes Tropicales* (eds. Herzog, S. K., Martínez, R., Jorgesen, P. M. & Tiessen, H.). Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE), París, pp. 1-22.
4. Apaéstegui, J., Cruz, F. W., Sifeddine, A., Vuille, M., Espinoza, J. C., Guyot, J. L., *et al.* (2014). Hydroclimate variability of the northwestern Amazon Basin near the Andean foothills of Peru related to the South American monsoon system during the last 1600 years. *Clim Past*, 10, 1967-1981.
5. Armijos, E., Crave, A., Vauchel, P., Fraizy, P., Santini, W., Moquet, J.-S., *et al.* (2013). Suspended sediment dynamics in the Amazon River of Peru. *J. South Am. Earth Sci.*, Hydrology, Geochemistry and Dynamic of South American Great River Systems, 44, 75-84.
6. Basher, R. (2006). Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.*, 364, 2167-2182.
7. Blázquez, J. & Nuñez, M. N. (2012). Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. *Clim. Dyn.*, 41, 1039-1056.
8. Boers, N., Bookhagen, B., Marwan, N., Kurths, J. & Marengo, J. (2013). Complex networks identify spatial patterns of extreme rainfall events of the South American Monsoon System. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4386–4392.
9. Brack, A. (1986). Gran geografía del Perú. En: *Ecología de un país complejo* (ed. Mejía Baca, M. J.). Manfer, España, pp. 175-319.

10. Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmalkar, A. & Céleri, R. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management. *Hydrol Earth Syst Sci*, 14, 1247-1258.
11. CEPLAN. (2011). *Plan bicentenario: El Perú hacia el 2021*. Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN), Lima.
12. Douglas, M. W., Mejia, J., Ordinola, N. & Boustead, J. (2009). Synoptic variability of rainfall and cloudiness along the coasts of Northern Peru and Ecuador during the 1997/98 El Niño event. *Mon. Weather Rev.*, 137, 116-136.
13. Espinoza, J. C., Chavez, S., Ronchail, J., Junquas, C., Takahashi, K. & Lavado, W. (2015). Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resour. Res.*, 51, 3459-3475.
14. Espinoza, J. C., Lengaigne, M., Ronchail, J. & Janicot, S. (2011a). Large-scale circulation patterns and related rainfall in the Amazon Basin: a neuronal networks approach. *Clim. Dyn.*, 38, 121-140.
15. Espinoza, J. C., Marengo, J. A., Ronchail, J., Carpio, J. M., Flores, L. N. & Guyot, J. L. (2014). The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environ. Res. Lett.*, 9, 124007.
16. Espinoza, J. C., Ronchail, J., Frappart, F., Lavado, W., Santini, W. & Guyot, J. L. (2013). The major floods in the Amazonas River and tributaries (Western Amazon Basin) during the 1970-2012 period: A focus on the 2012 flood. *J. Hydrometeorol.*, 14, 1000-1008.
17. Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., *et al.* (2009). Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *Int. J. Climatol.*, 29, 1574-1594.
18. Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., *et al.* (2011b). Climate variability and extreme drought in the upper Solimões River (western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13406.
19. Espinoza Villar, J. C., Guyot, J. L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., *et al.* (2009). Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). *J. Hydrol.*, 375, 297-311.

20. Espinoza Villar, R., Martinez, J.-M., Guyot, J.-L., Fraizy, P., Armijos, E., Crave, A., *et al.* (2012). The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *J. Hydrol.*, 444–445, 221-228.
21. Fernandes, K., Baethgen, W., Bernardes, S., DeFries, R., DeWitt, D. G., Goddard, L., *et al.* (2011). North Tropical Atlantic influence on western Amazon fire season variability. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L12701.
22. Garreaud, R. D. (2000). Cold air incursions over subtropical South America: Mean structure and dynamics. *Mon. Weather Rev.*, 128, 2544-2559.
23. Gutiérrez, D., Bertrand, A., Wosnitza-Mendo, C., Dewitte, B., Purca, S., Peña, C., *et al.* (2011a). Sensibilidad del sistema de afloramiento costero del Perú al cambio climático e implicancias ecológicas. *Rev. Peru. Geo-Atmosférica*, 3, 1-24.
24. IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Ginebra, Suiza.
25. IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge (U.K.) and New York (U.S.A.).
26. IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. *World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.*
27. Josse, C., Cuesta Camacho, F., Navarro, G., Barrena, V., Becerra, M. T., Cabrera, E., *et al.* (2012). Geografía física y ecosistemas de los Andes tropicales. En: *Cambio climático y biodiversidad en los Andes tropicales* (eds. Herzog, S. K., Martinez, R., Jorgesen, P. M. & Tiessen, H.). Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), Sao José dos Campos, y Comité Científico sobre Problemas del Medio Ambiente (SCOPE), París, pp. 177-194.
28. Lagos, P., Silva, Y., Nickl, E. & Mosquera, K. (2008). El Niño? related precipitation variability in Perú. *Adv. Geosci.*, 14, 231-237.

29. Lavado-Casimiro, W. & Espinoza, J. C. (2014). Impacts of El Niño and La Niña in the precipitation over Perú (1965-2007). *Rev. Bras. Meteorol.*, 29, 171-182.
30. Lavado-Casimiro, W., Felipe, O., Silvestre, E. & Bourrel, L. (2013a). ENSO impact on hydrology in Peru. *Adv. Geosci.*, 33, 33-39.
31. Lavado-Casimiro, W. S., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J. C. & Guyot, J.-L. (2013b). Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon-Andes basin over the last 40 years (1965-2007). *Hydrol. Process.*, 27, 2944-2957.
32. Marengo, J. A. & Espinoza, J. C. (2015). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.*
33. Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R. & Rodriguez, D. A. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L12703.
34. Marengo, J., Cornejo, A., Satyamurty, P., Nobre, C. & Sea, W. (1997). Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. *Mon. Weather Rev.*, 125, 2759-2786.
35. Mark, B. G. (2008). Tracing tropical Andean glaciers over space and time: Some lessons and transdisciplinary implications. *Glob. Planet. Change, Historical and Holocene glacier – climate variations*, 60, 101-114.
36. MINAGRI. (2012). *Plan de gestión de riesgo y adaptación al cambio climático en el sector agrario, período 2012-2021*. Ministerio de Agricultura (MINAGRI), Lima.
37. MINAM. (2009). *Política nacional del ambiente*. Ministerio del Ambiente (MINAM), Lima.
38. Norabuena, E.O., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I.S., Ocola, L., & Ellis, M. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the central Andes. *Science*, 279, 358–362.
39. Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Caceres, B., Ceballos, J.L., *et al.* (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7, 81-102.
40. Takahashi, K. (2004). The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997--1998 and 2002 El Niño events. *Ann Geophys*, 22, 3917-3926.
41. Takahashi, K. & Dewitte, B. (2015). Strong and moderate nonlinear El Niño regimes. *Clim. Dyn.*, 1-19.

42. Thouret, J.-C., Rivera, M., Wörner, G., Gerbe, M.-C., Finizola, A., Fornari, M. & Gonzales, K. (2005). Ubinas: the evolution of the historically most active volcano in southern Peru. *Bull. Volcanol.*, 67(6), 557-589.
43. UNISDR. (2006). *Developing early warning systems, a checklist: third international conference on early warning (EWC III)*. Bonn, Germany.
44. Urrutia, R. & Vuille, M. (2009). Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 114, D02108.

ANEXOS

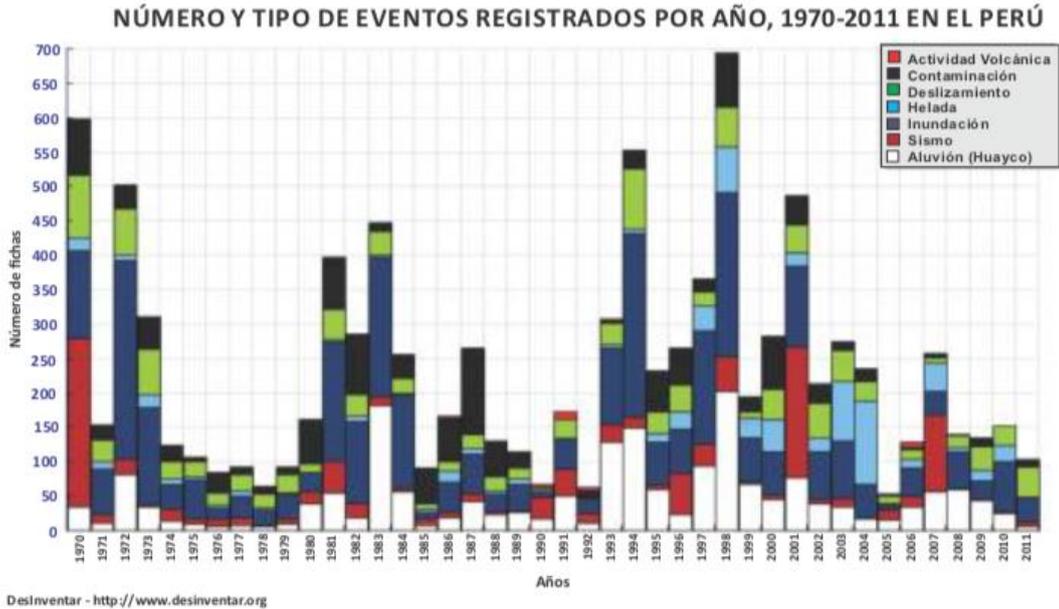


Figura A.1 Número y Tipo de eventos registrados por año, 1970-2011 en el Perú (FUENTE: PLANGERD, 2014-2021)

IMPACTO EN LA POBLACIÓN Y VIVIENDAS SEGÚN DESASTRES EN EL PERIODO 2003-2012

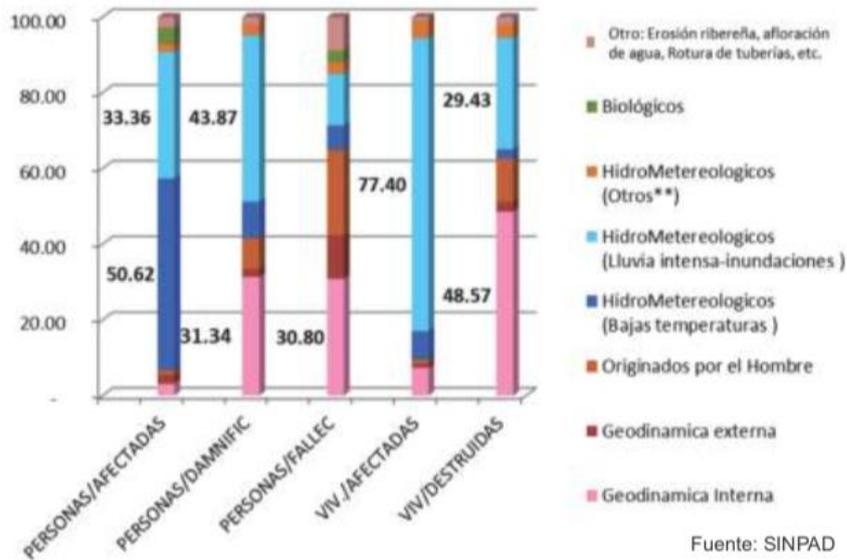


Figura A.2 Impacto en la Población y Viviendas según Desastres en el Periodo 2003-2012 (FUENTE: SINPAD en PLANGERD (2014-2021))