

POTENCIAL DE LA PERCEPCIÓN REMOTA – ESTUDIO BASADO EN DESASTRES NATURALES OCURRIDOS DURANTE LOS ÚLTIMOS 5 AÑOS EN CHILE

*Potential of Remote Sensing – A study based on natural disasters occurred during
the last 5 years in Chile*

GUIDO STAUB¹
HANS-PETER BÄHR²

¹Departamento de Cs. Geodésicas y Geomática, Universidad de Concepción –
Campus Los Ángeles, J. A. Coloma 0201, Los Ángeles, Chile

²Instituto de Fotogrametría y Percepción Remota, Karlsruhe Institute of
Technology, Englerstr. 7, Karlsruhe, Alemania
gstaub@udec.cl; hans-peter.baehr@kit.edu

RESUMEN

A través de desastres naturales ocurridos en Chile durante los últimos 5 años se ejemplifica como observaciones adquiridas por los diversos sensores, hoy en día disponibles en la Percepción Remota, fueron utilizadas con éxito en varias ocasiones, tanto durante como después de que ha ocurrido una catástrofe. Los ejemplos presentados en el presente artículo están relacionados con el terremoto y posterior tsunami ocurrido en febrero 2010 y las erupciones volcánicas en los años 2008 y 2011. Se da a conocer las plataformas y los sensores remotos más convenientes para realizar una administración moderna de desastres naturales. Aunque el catastro de daños producidos por un desastre natural es la aplicación más conocida en público, la Percepción Remota también puede ser usada en todas las fases de su administración: Mitigación, Preparación, Respuesta y Recuperación. Por tal motivo también se muestra como y en que situación puede ser útil el uso de datos adquiridos por sensores remotos. Como la Percepción Remota puede ser considerada como una de las más importantes herramientas en el ámbito de la administración de desastres naturales se concluye que en un país como Chile, su aplicación debe ser intensificado para poder superar cualquier catástrofe.

Palabras claves: Percepción Remota; Desastres Naturales; Administración de Desastres Naturales; Chile.

RESUMO

Através dos desastres naturais experimentados no Chile nestes últimos cinco anos, fica exemplificado como observações provenientes desde diferentes sensores disponíveis hoje no Sensoriamento Remoto, foram utilizadas com sucesso em várias ocasiões, durante e após da ocorrência dos desastres. Portanto, os exemplos apresentados neste artigo estão relacionados com o terremoto bem como com o tsunami de fevereiro de 2010, além de erupções vulcânicas, em 2008 e 2011. Adicionalmente, serão apresentadas as plataformas e o sensoriamento remoto mais conveniente para a gestão moderna de desastres naturais. Embora o registro de danos causados por um desastre natural é a aplicação mais conhecida do Sensoriamento Remoto, também pode ser usado em todas as fases da administração: Mitigação, Preparação, Resposta, Recuperação. Por esta razão, também se apresenta como, e em que situação pode ser útil utilizar os dados adquiridos pelos sensores remotos. Uma vez que o sensoriamento remoto pode ser considerado uma das ferramentas mais importantes no campo da gestão de desastres naturais, conclui-se que em um país como o Chile, a sua aplicação deve ser intensificada para superar qualquer desastre.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Desastres Naturais; Gestão de Desastres Naturais; Chile.

ABSTRACT

Through natural disasters that have occurred during the past five years in Chile, it is exemplified how observations acquired by different Remote Sensing sensors nowadays available, have been used successfully on several occasions, both of them during and after a disaster has occurred. The examples presented in this article are based on the earthquake and tsunami in February 2010, and volcanic eruptions in 2008 and 2011. Furthermore, those remote sensing platforms are presented that are most relevant for modern disaster management. Although damage registration is the most known application in public, Remote Sensing can also be used in all the other phases: Mitigation, Preparedness, Response and Recovery. Therefore, this article also shows how and in which situation remotely sensed data can be useful. As Remote Sensing can be considered as one of the most important tools in the field of natural disaster management we conclude that in a country like Chile, its usage must be intensified to overcome any type of natural disaster.

Keywords: Remote Sensing; Natural Disasters; Disaster Management; Chile.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos cinco años, Chile ha sufrido de una serie de catástrofes naturales. La más considerable fue sin duda el mega-terremoto del Maule el 27 de

febrero 2010 cuya magnitud fue de 8.8 en la escala Richter. Sin embargo, los grandes daños a lo largo de la costa chilena, entre la séptima y la octava región, fueron generados por un Tsunami que generó este movimiento telúrico. Sin embargo, lo que sucedió con mucha más frecuencia, y por tanto es una amenaza permanente, fueron erupciones volcánicas. Las más notables fueron el volcán Chaitén (2008), el complejo volcánico Puyehue-Cordón Caulle (2011) y el volcán Copaué (2013).

En general, son fenómenos geológicos (XUEZHENG et al., 2002; KAHMEN et al., 2007), hidrológicos (TEMIMI et al., 2005; VENKATESWRLU, 2004) y atmosféricos (CHOUDHURY, 1994; UDDSTROM et al., 2007) que causan el inicio de tales eventos. Por lo tanto son observables a través de técnicas y métodos que se utilizan en la Percepción Remota por satélite. Los datos adquiridos por sensores remotos sobre tales eventos son de gran utilidad cuando debe ser realizada una administración de desastres naturales (SMARA, 2005). Por tal motivo, no solamente deben ser usados en el momento mismo (BÄHR et al., 2004), cuando ocurre una catastrofe, sino también deben ser almacenados, analizados e integrados durante las fases previa y posterior a un evento (STEINBRUCH et al., 2002).

En el caso de la administración de desastres naturales los objetivos principales son el monitoreo de la situación actual para generar y llenar las bases de datos de aquellas instituciones comprometidas con el manejo adecuada de la situación de emergencia, como son bomberos, cruz roja, carabineros, etc.. Y además son indispensables durante la Mitigación y Preparación para poder realizar simulaciones de fenómenos naturales con alta precisión y calidad para obtener modelos de predicción y proponer medidas apropiadas (NIRUPAMA y SIMONOVIC, 2002). Así, la Percepción Remota entrega los datos básicos que son necesarios para la realización de tareas específicas como por ejemplo:

- Detección de daños y determinación de la magnitud del desastre
- Identificación de áreas afectadas
- Planificación de primer auxilio
- Localización de lugares no afectados para la instalación de personal de rescate, centros de planificación y albergues
- Simulación de posible amenazas a través de modelos matemáticos-científicos
- Planificación de medidas preventivas
- Seguimiento de la fase de Recuperación
- Generación y Actualización de mapas
- Etc.

2. ADMINISTRACIÓN DE DESASTRES NATURALES

Las acciones y tareas en el marco de una administración de desastres naturales son permanentes y por eso están formando en un ciclo (figura 1) que consta de las siguientes cuatro fases (EMA, 2008):

- (a) *Mitigación*: incluye todas las actividades para prevenir una emergencia, reducir la posibilidad que una emergencia ocurre o disminuir los daños de una emergencia inevitable
- (b) *Preparación*: incluye varias medidas que tienen como objetivo que la sociedad está preparada y puede reaccionar a cualquier desastre
- (c) *Respuesta*: son todas las acciones que se debe realizar al tiro cuando una emergencia ocurre con el objetivo de rescatar, minimizar el daño y empezar con la Recuperación
- (d) *Recuperación*: consta de todas las actividades necesarias para restablecer una situación normal y mejorada

Sin embargo, es necesario hacer hincapie en un aspecto que en general no está considerado y que está relacionado con la identificación de entidades que demostraron una conducta errónea durante una de las cuatro fases mencionadas. Tal actuación puede dejar ciertas medidas mal implementadas y en consecuencia puede aumentar la magnitud de los daños provocados por el desastre. Por lo tanto, el conocimiento de los responsables es de gran importancia y no solamente para el aprendizaje, sino en especial para las aseguradoras y el estado porque son ellos que deben recompensar a los damnificados.

Figura 1 - Ciclo de las cuatro fases de la administración de desastres naturales.



2.1 Percepción Remota en la Administración de Desastres Naturales Específicos

El conocimiento de las actividades específicas que se realizan en el marco de la administración de desastres naturales, es fundamental para poder elegir aquellos sensores remotos que realmente entregan datos de gran utilidad. En el caso de desastres naturales como Terremotos, Erupciones volcánicas y Tsunami, en primer instancia la siguiente tabla (Tabla 1) muestra posibles tareas las cuales deben ser realizadas en cada una de las cuatro fases en cuestión.

Tabla 1: Objetivos específicos que pueden ser logrados a través de la Percepción Remota.

<i>Desastre</i>	<i>Mitigación</i>	<i>Preparación</i>	<i>Respuesta</i>	<i>Recuperación</i>
Terremoto	Generación de mapas del lineamiento y del uso del suelo	Monitoreo de deformaciones y de la actividad sísmica	Adquisición de datos en tiempo casi real sobre áreas destruidas y daños	Detección de defectos arquitectónicos en ciertas cuadras
Erupción Volcánica	Generación de mapas topográficos y del uso del suelo	Monitoreo de deformaciones, de la actividad sísmica y de la atmósfera	Adquisición de datos en tiempo casi real sobre el flujo de lava y lahares y monitorear las nubes de cenizas	Determinación del grado de contaminación y caminos de la lava
Tsunami	Generación de mapas del uso del suelo	Confección de modelos hidrológicos	Adquisición de datos en tiempo casi real sobre áreas inundadas	Determinación de nuevas áreas de riesgo, sedimentación y contaminación

2.2 Satélites y Sensores Aplicables en la Administración de Desastres

La mayoría de los sensores remotos, tanto pasivo como activo, que hoy en día están instalados en satélites pueden ser utilizados para realizar observaciones durante las diferentes fases de la administración de desastres. La tabla 2 muestra a continuación un resumen de los sensores pasivos más recientes y de sus características más notables.

Las observaciones adquiridas por los sensores mencionados anteriormente, principalmente son usadas en el estudio del medio ambiente. Por lo tanto, en el entorno de la administración de desastres son de gran utilidad cuando se trata de Mitigación, Respuesta y Recuperación. En caso de la fase de Recuperación, se hace uso de técnicas como InSAR (Interferometría Radar) o dInSAR (diferencial) porque son técnicas basándose en observaciones múltiples adquiridos por SAR (Synthetic Aperture Radar) que permiten generar datos de gran precisión. Además, Radar por si mismo es un caso especial en la Percepción Remota debido a la posibilidad de ser aplicable 24 horas al día y de ser independiente de la situación climática. Tabla 3 completa entonces el resumen con la mención de sensores activos aplicando microondas, en este caso SAR.

Tabla 2 - Propiedades de unos sensores pasivos (SAF, 2013; NASA, 2013; DigitalGlobe, 2013; ASTRIUM, 2013; RapidEye, 2010).

Sistema (año lanzamiento)	Número canales	Resolución		
		Geométrica	Radiométrica	Espectral
FASat-Charlie (2011)	5	5.8m (Canales 1-4) 1.45m (Pan)	10 bit	0.455-0.881µm 0.445-0.744µm
Landsat 8 (2013)	11	15m (Canal 8) 30m (Canales 1-7,9) 100m (Canales 10, 11)	12 bit	0.500-0.680µm 0.433-2.300µm 10.9-11.5µm
WorldView-2 (2009)	8	1.8m (MS) 0.5m (Pan)	11 bit	0.400-1.040µm 0.450-0.800µm
Pleiades 1A,1B (2011, 2012)	5	2m (Canales 1-4) 0.5m (Pan)	8 o 16 bit	0.430-0.94µm 0.47-0.83µm
GeoEye-1 (2008)	5	1.65m (MS) 0.41m (Pan)	11 bit	0.450-0.900µm
RapidEye (2008)	5	6.5m (MS)	12 bit	0.440-0.850µm

Tabla 3 - Propiedades de algunos sensores activos y sus aplicaciones (ESA, 2010; RADARSAT, 2008; DLR, 2010; CEAS, 1996).

Sistema (año lanzamiento)	Banda usada	Resolución geométrica	Aplicación
ALOS-PALSAR (2006)	L (1,27 GHz)	7m-100m	Mapas en 3D, clasificación geológica, extensión de inundaciones y estimación de daños
Radarsat-2 (2007)	C (5,405 GHz)	3m-100m	Mapas en 3D, Detección de contaminaciones, extensión de inundaciones y estimación de daños
TerraSAR-X (2007)	X (9,65 GHz)	1m-16m	Mapas en 3D, Detección de deslizamiento y daños, Monitoreo de regiones de riesgo
TanDEM-X (2010)	X (9,65 GHz)	1m-16m	Medición de Altitudes, Generación de Modelos de Terreno

3. TERREMOTOS

La causa principal de los terremotos son los movimientos continuos de las placas tectónicas que resultan en roces, deformaciones y roturas. La liberación brusca de la energía acumulada durante este proceso produce las ondas sísmicas.

En particular se utilizan datos adquiridos por los sensores remotos, durante y después una emergencia producida por un terremoto. Significa principalmente que su utilidad se encuentra para cartografiar daños y ayudar en la fase de *Respuesta*. En todas las otras fases el posible uso de la Percepción Remota está limitado. Sin embargo, para el aprendizaje que permite evitar errores en la conducta de los involucrados, el análisis y estudio del evento a través de imágenes satelitales es indispensable. Es probable que puede apoyar durante el mapeo de regiones, comunas, ciudades e incluso poblaciones que por sus características socio-económicas sufran pérdidas mayores, pero una predicción de la posibilidad que ocurre un terremoto, del posible daño o donde puede ocurrir es, hasta el momento, imposible.

Por el gran impacto que produce un terremoto en una zona afectada, es necesario aplicar sensores que por sus características específicas permiten observar daños típicos a gran, mediana y pequeña escala. Tales daños pueden ser por ejemplo edificios derrumbados o con daños severos en su estructura, caminos destruidos o parcialmente cortados o cortes en el suministro eléctrico.

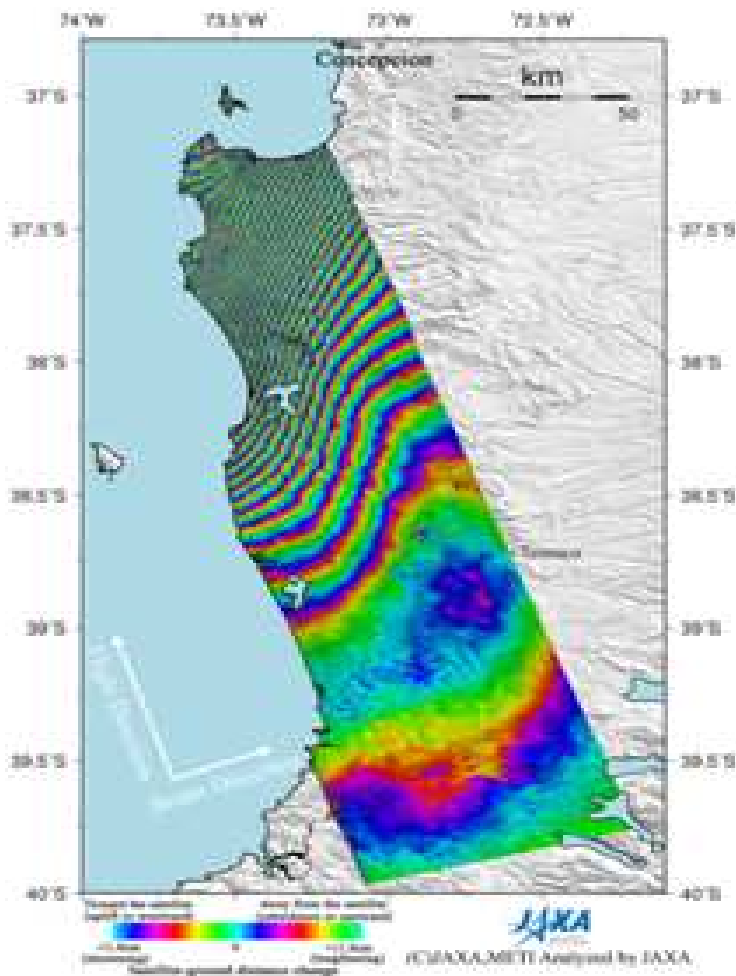
Una posibilidad que existe hoy en día para realizar un monitoreo de deformaciones de la corteza y por lo tanto enfrentar las fases de Mitigación y Preparación, ofrece la antes mencionada técnica d-InSAR. A través de la Interferometría diferencial con RADAR es posible monitorear el movimiento de las placas tectónicas observable en una superficie de mayor extensión. A través de una combinación con otras técnicas como GNSS o sismómetros es posible aumentar aún más la precisión y confiabilidad de la información generada.

3.1 Ejemplo Terremoto 27 de Febrero 2010

El mega-terremoto de Maule, ocurrido el 27 de febrero del año 2010, tuvo una magnitud de 8.8 en la escala de Richter. Este terremoto ocurrió en la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, a una profundidad focal de 35km. La ubicación del epicentro fue 35,909°S y 72,733°W en el océano pacífico en la cercanía de la localidad de Cobquecura. La zona de falla (el segmento del contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana) que se activó alcanzó un área del orden de 67500 kilómetros cuadrados con un desplazamiento superior a 10 m (BARRIENTOS, 2010). Según Saragoni (2011), las pérdidas llegaron aproximadamente a un 18% del producto interno bruto chileno.

Por un lado, Bevis (2010), indicó que varias ciudades de Sudamérica se desplazaron, entre otros Concepción (3.35m hacia el oeste), Santiago (28cm hacia el suroeste) y Buenos Aires (2,5cm hacia el oeste) se desplazaron, producto del terremoto. Mientras que Barrientos (2010) y Tong et al. (2010) además aclararon que estos cambios topográficos, es decir en la vertical, fueron estudiados a través de InSAR.

Figura 2 - Interferograma generado a partir de observaciones adquiridas por PALSAR. Fuente: <http://www.eorc.jaxa.jp/>.



Este estudio se realizó basándose en interferogramas que a través de observaciones adquiridos por el instrumento PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) fueron generados para el área afectada por el terremoto. El ejemplo que muestra figura 2 permite determinar la magnitud con la cual se elevó el área. En este caso específico que muestra los *fringes* (franjas que componen el modelo de interferencia) para el sector entre la península de Arauco y el sector de Villarica/Panguipulli, cada fringe corresponde a un cambio altimétrico de 11cm.

Contando los *fringes*, claramente se puede observar que la zona costera entre Lota y Lebu, la península de Arauco, se elevó, mientras que el sector hacia el sureste de Temuco bajó.

4. TSUNAMI

Aproximadamente un 90% de los tsunamis es provocado por un maremoto, mientras que el restante 10% tiene sus causas en erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, meteoritos y explosiones submarinas. Los daños que puede provocar un tsunami dependen principalmente de la magnitud del evento que lo provocó, de la distancia entre el lugar donde se provocó y la costa y de la topografía de la zona costera afectada.

En el caso de un tsunami, la Percepción Remota es utilizada en todas las fases de una administración moderna de desastres naturales. Sin embargo, en la mayoría de los casos es utilizada antes de una emergencia, es decir en la fase de la *Preparación* cuando es muy probable que una inundación por un tsunami puede ocurrir. Además es muy útil en la fase de *Respuesta* cuando es necesario saber cuales fueron los daños que se generaron. Es aplicable en la fase de *Recuperación*, cuando la tarea principal es restablecer una situación normal, detectar contaminación y tomar medidas preventivas para disminuir el impacto un tsunami en el futuro. Durante la fase de *Mitigación*, los datos adquiridos por sensores remotos pueden ser útiles para simular tales eventos.

Las zonas de seguridad son aquellos sectores los cuales se encuentran fuera del área de riesgo de inundación, permitiendo a la población evacuar y acceder a servicios básicos de atención, admitiendo establecerse en forma segura en el terreno.

Para ello, se analizan los sectores más altos, deben encontrarse sobre los 30 metros de altura del área de inundación, siendo a la vez terrenos abiertos y fácilmente accesibles en el menor tiempo posible, ya sea caminando o en vehículos.

Se delimita las superficies seguras como lo proponen por ejemplo Wegscheider et al., 2011 o Strunz et al., 2011, cuando se encuentran fuera de las áreas analizadas que han sido anegadas por el tsunami, y teniendo un buen acceso a través de las calles principales, las cuales, pueden entregar un acceso fuera de peligro en el menor tiempo posible para la evacuación. El MDE (Modelo Digital de Elevación) permite obtener zonas más altas y alejadas de la zona de inundación, de esta manera se utiliza el modelo en 3D, el cual resalta la información visual necesaria para realizar la delimitación de las zonas de seguridad.

En general, por la gran superficie afectada por un tsunami, sensores remotos de una resolución media (4 metros a 30 metros) son usados en todas las fases de la administración de desastres naturales. La Topografía, el uso del suelo, regiones cubiertas por nieve o la cuenca hidrográfica son solamente algunos parámetros que pueden ser observadas mediante estos sensores. Además, en ciertas ocasiones, como la generación de mapas a escala grande pueden ser usados sensores de alta resolución geométrica.

En particular, hay que mencionar que satélites equipados con sensores de Radar ofrecen más posibilidades de monitorear un evento cuando ocurre. Principalmente debido a sus propiedades espectrales que permiten su aplicación independiente del tiempo y de la iluminación solar.

4.1 Ejemplo Tsunami (Post-Terremoto) - 2010

El terremoto del 27 de febrero 2010 que sacudió a la zona centro sur de Chile, provocó un Tsunami el cual destruyó grandes partes de las costas, especialmente en las ciudades Concepción, Constitución, Dichato y Pichilemu. Uno de los lugares más afectados por esta catástrofe fue la localidad de Talcahuano, ubicada en la región del Biobío. Un fuerte tsunami, provocado principalmente a la gran magnitud del terremoto, afectó a las costas de esta ciudad, arrastrando navíos hacia el centro de esta, cubriendo de agua, barro y escombros sus calles, provocando daños en las poblaciones aledañas a la costa.

Se hacía necesario saber, cuáles fueron las áreas más propensas de ser inundadas por un tsunami en esta ciudad, y de esta manera confirmar las áreas anegadas, ya que así es posible establecer las zonas de seguridad de dicha ciudad costera. De esta manera la población puede tomar ciertas precauciones como por ejemplo evacuar hacia las áreas más altas de la ciudad, para así establecerse por plazos cortos en estas áreas de seguridad.

Para analizar la destrucción provocada por el tsunami, se realizó un análisis a través de técnicas de Percepción Remota, apoyadas por un Modelo digital de elevación, visualizando la destrucción que generaron las olas al momento de ingresar a las costas chilenas. Para el análisis se generaron, olas con variadas magnitudes, ya que de esto dependerá su grado de destrucción.

A través de este análisis se podía establecer cuáles fueron los asentamientos urbanos afectados y determinar cuales serían propensos ante un eventual tsunami. Además se verificó cuales fueron los sectores que sufrieron más daños producto del tsunami; por lo que se pueden tomar medidas de seguridad y evitar la urbanización en aquellos sectores amenazados, debido a la alta vulnerabilidad que éstos presentan y que por lo tanto, pueden ser afectados por un nuevo suceso en el futuro.

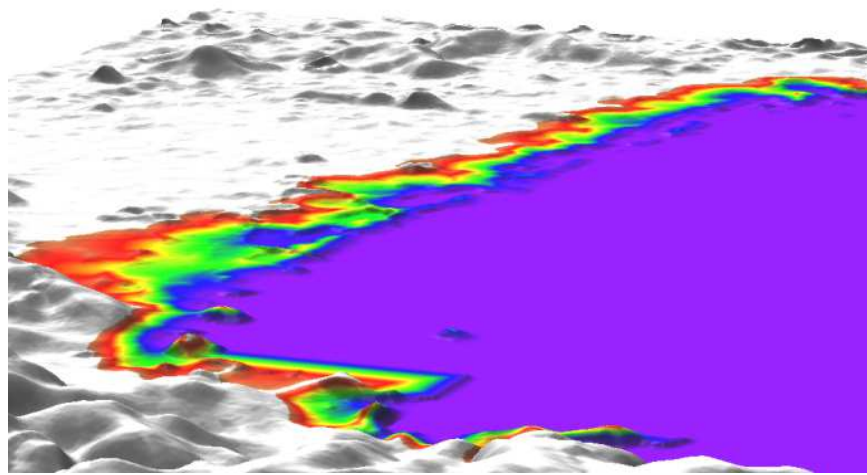
En la figura 3 se muestra una imagen satelital tomada por los satélites del sistema RapidEye que muestra las zonas afectadas por el Tsunami en la Bahía Concepción. Esta imagen fue tomada a las 15:40 horas el 27 de febrero 2010 y puede ser utilizada en un posible estudio que tiene como objetivo por ejemplo la cuantificación de los daños.

Para tener conocimiento en forma visual sobre cuáles serán los sectores más propensos a inundarse, será fundamental para la generación de mapas y análisis visual esta imagen puesto que su resolución espacial es alta lo que hace que se obtenga un mayor grado de detalle para estos tipos de trabajos.

Figura 3 - Imagen satelital (orientada hacia norte) de la Bahía Concepción que muestra los sectores inundados el 27.02.2010 a las 15:40 horas. Sensor: RapidEye-3. Fuente: RapidEye (2010). Escala aproximada: 1:8000.



Figura 4 - Determinación de zonas vulnerables en la Bahía Concepción. Escala aproximada: 1:60000.



Consideranda además archivos del ASTER-GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model) que muestran

la Bahía Concepción es posible determinar las zonas más propensas a un evento de similar, mayor o menor magnitud.

La Bahía Concepción, fue afectada por olas con magnitudes aproximadamente de 5 metros de altura, y al momento de analizar la imagen que ejemplifica lo mencionado, se aprecia el sector dañado, lo que concuerda con lo afectado en la realidad, ya que el sector del Morro, uno de los más inundados en esta ocasión, y las poblaciones cercanas a la costa se vieron perturbados.

El impacto a pesar de aumentar o disminuir provocará el mismo daño, puesto que se verá influido por la topografía del lugar, ya que no existen lugares altos, ya sea cumbres, dunas, las cuales puede disminuir el riesgo de impacto o de una inundación. Como se ha mencionado la pendiente geográfica del sector tiene gran influencia para resistir catástrofes de gran magnitud. Los sectores más propensos a sufrir este impacto son las planicies que se encuentran en la zona, puesto que facilita el ingreso del agua, lo que hace que se produzcan un mayor choque entre la ola y el terreno del lugar, que está compuesto por edificaciones, flora y accidentes geográficos. Esto último tiene un excelente aporte para estos tipos de catástrofes, puesto que, disminuye el riesgo de inundación y destrozos cuantitativos en la población y ciudad, ya que, actúan como escudos protectores.

La dirección que pueda tomar el tsunami tiene influencia en el impacto y la inundación provocado, ya que las zonas afectadas son aquellas que se encuentran en el borde costero, esto se debe a lo mencionado anteriormente (Alarcón, 2011).

5. ERUPCIÓN VOLCÁNICA

Un volcán es aquel lugar donde la roca fundida o fragmentada por el calor y gases calientes desbordan a través de un cráter desde redes complejas dentro de la tierra a la superficie.

Este tipo de desastre es una amenaza no solamente para poblaciones sino también para el tráfico aéreo. Por eso la Percepción Remota es aplicada tanto en el monitoreo de las nubes de cenizas (*Respuesta*) como el monitoreo continuo de volcanes activos (*Mitigación y Preparación*) y la detección del flujo de lahares y de la lava durante el desastre (*Respuesta*). En la fase de la *Recuperación* la Percepción Remota sirve para detectar el grado de la contaminación y para poder cartografiar los caminos y las huellas generados por la lava.

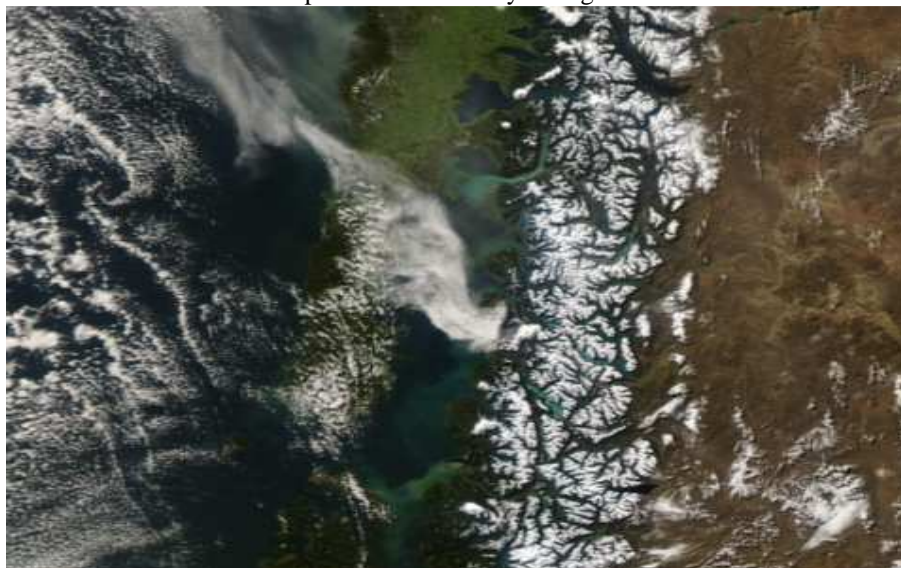
Las mayoría de las tareas recién mencionadas en la administración de desastres naturales son aquellas que hacen uso de sensores pasivos en los momentos antes de la erupción y cuando la erupción ya ha culminado. Durante el evento los sensores pasivos sirven solamente para monitorear las nubes de cenizas. Todos los procesos que ocurren en la superficie no son visibles desde el espacio con este tipo de sensores. Por lo tanto es necesario usar un sistema activo como es el de Radar que permite obtener una vista debajo de las nubes.

5.1 Ejemplo Volcán Chaitén - 2008

En mayo 2008 ocurrió la erupción del volcán Chaitén en el sur de Chile que forzó la evacuación total de las poblaciones aledañas al volcán. Además fue necesario suspender todas las operaciones hacia y desde el aeropuerto de Puerto Montt, debido a la presencia de cenizas emitidas por el volcán Chaitén en el espacio aéreo cercano al aeropuerto.

Figura 5 muestra una imagen del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite AQUA que fue tomada para monitorear la actividad del volcán Chaitén y la nube de cenizas producida.

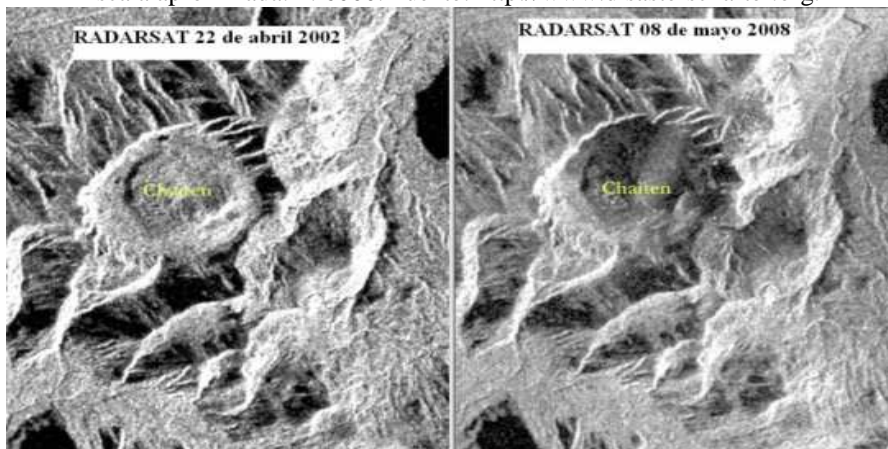
Figura 5 - Imagen satelital mostrando el volcán Chaitén y la nube de cenizas. Sensor: MODIS. Escala aproximada: 1:500000. Fecha: 19 de julio 2008. Fuente: <http://earthobservatory.nasa.gov/>.



En cambio, la siguiente figura 6 muestra dos imágenes del volcán Chaitén adquiridas por Radarsat-2. A la izquierda se muestra el cráter antes de la erupción, el 22 de abril 2002. A la derecha la situación el 8 de mayo 2008.

Ambos ejemplos demuestran el potencial de los sensores activos y pasivos. Con un sensor de resolución geométrica baja como es el MODIS se puede realizar perfectamente un monitoreo de la nube de cenizas y de su propagación. Sin embargo, para poder estudiar el cráter, es necesario generar una vista que penetra la nube. La única posibilidad para hacerlo es a través de un sensor activo como por ejemplo Radarsat-2.

Figura 6 - Comparación del cráter antes y durante la erupción. Sensor Radarsat-2.
Escala aproximada: 1: 6000. Fuente: <http://www.disasterscharter.org>.



5.2 Ejemplo Cordón Caulle 2011

A mediados del año 2011 entró en erupción el complejo volcánico fisural Cordón Caulle, ubicado en el llamado Complejo Volcánico Puyehue – Cordón Caulle (CVPCC) localizado en la X Región de Los Lagos en Chile. La emanación de gases y la caída de cenizas trajeron numerosos inconvenientes, afectando de manera directa e indirecta la vida de la población aledaña al volcán. La magnitud del impacto ambiental se relaciona en gran medida con la cantidad y el tipo de ceniza caída. En el caso de la vegetación, se considera que las cenizas depositadas sobre las hojas actúan como un sombreado, reduciendo la cantidad de luz solar que las plantas pueden recibir, lo que finalmente resulta en una disminución notable de la actividad fotosintética de la planta.

El objetivo del estudio desarrollado por Mora et al., 2013 fue cuantificar los efectos de las cenizas volcánicas sobre diferentes tipos de flora y fauna del Parque Nacional Puyehue a través del comportamiento del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) y con material recopilado en terreno. La metodología aplicada se basó en determinar el estado de la vegetación al interior del Parque Nacional Puyehue mediante un análisis multitemporal y multispectral de imágenes satelitales adquiridas por LANDSAT 7 ETM+. Después de una fotointerpretación visual del área de interés que abarca una superficie de aproximadamente 26000 hectáreas, fueron analizadas las firmas espectrales de los diversos tipos de vegetación: antes, durante y después de la erupción, para conocer el comportamiento de la capa vegetal en distintas épocas. Y enseguida, fue realizado el cálculo del NDVI para poder determinar el definitivo estado de la vegetación. Basándose en estos métodos se obtuvo una evaluación de

los resultados, los cuales permitieron la determinación de la efectividad de su aplicación para la cuantificación de la vegetación afectada por cenizas volcánicas.

Figura 7 - Complejo Volcánico Puyehue – Cordón Caulle. Sensor: ALI (Advanced Land Imager) a bordo de Earth Orbiting Mission 1 (EO-1) Escala aproximada: 1:20000.



El cálculo del NDVI fue efectuado para aquellos sectores donde fue posible comprobar los resultados en terreno o a través de información secundaria. Fueron estudiados sectores cuya superficie es similar (aproximadamente 43 hectáreas). Los sectores en cuestión se encuentran aledaños al complejo fronterizo Cardenal A. Samoré, en la cercanía de Aguas Calientes y a un costado de la Laguna el Pato.

A pequeña escala es posible indicar que en septiembre del año 2011, un 62 por ciento de la vegetación (principalmente bosques nativos) está bajo una densa capa de material volcánico. En cambio, en septiembre del año 2012 solo un 38 por ciento de la vegetación está cubierta por material volcánico. Ha habido una disminución de la capa de cenizas por efecto del cese de la actividad volcánica, y además por efecto de lluvias y vientos predominantes en esa zona.

Perfiles espectrales muestran para el año 2011 un aumento en la reflectancia del espectro visible y una marcada disminución en la reflectancia hacia el infrarrojo cercano, comparándolos con los perfiles espectrales del año anterior. Principal causa es una capa de cenizas que cubrió los árboles de hoja perenne. Para el año 2012 los perfiles espectrales se muestran cercanos a los niveles normales de reflectancia para una vegetación sana. Aún existe una baja hacia el infrarrojo cercano, es decir que la vegetación no se ha recuperado por completa.

El estudio del NDVI permite indicar que en el caso del sector cercano a Aguas Calientes, durante Septiembre 2011 una superficie de 29,7 hectáreas lo que

corresponde a un 69 por ciento del área de estudio, se encuentra afectada por la caída de cenizas. El panorama no es el mismo al medir la superficie dañada para septiembre de 2012, que se reduce a aproximadamente 3000 metros cuadrados.

En el sector cercano al Complejo Fronterizo Cardenal A. Samoré, para Septiembre de 2011, solamente 4,2 hectáreas (un 10 por ciento) de la vegetación presente muestran una actividad fotosintética normal, mientras que el NDVI correspondiente al año 2012 indica que gran parte de la vegetación se había recuperado; 39 hectáreas de vegetación con actividad fotosintética normal (de un total de 44 hectáreas estudiadas).

En el sector correspondiente a Laguna El Pato para el año 2011 se puede identificar una superficie de 3,7 hectáreas afectada, es decir que un 83,6 por ciento de la superficie estudiada cuenta con una baja actividad fotosintética por la caída de material volcánico. Sin embargo para septiembre de 2012 hay una leve mejoría en la vegetación del sector por lo que el porcentaje de vegetación afectada se reduce a un 65,3 por ciento.

En general, el resultado para septiembre de 2011 indica una baja actividad fotosintética de la vegetación comparándolo con la situación observada en septiembre del año siguiente. Se observa que hay un claro aumento de la actividad fotosintética en 2012, que se debe en parte al cese de la actividad volcánica y emanación de humo, lo que permitió que las lluvias correspondientes a la época (transición invierno- primavera), fueran más limpias. De este modo el follaje de los árboles perennes se despojó de las cenizas, permitiendo la realización del proceso de fotosíntesis.

6. CONCLUSIONES

La Percepción Remota con su multitud de satélites y sensores permite en todas las fases de una administración moderna de desastres naturales, apoyar a las autoridades y responsables tanto en gabinete como en terreno. El beneficio de tal administración no se encuentra solamente durante una emergencia sino también antes y después cuando es necesario tomar medidas preventivas y restablecer una situación normal. Por su parte ya fue aplicada en varias ocasiones en Chile y mostró su fortaleza en observar, catastrar y monitorear regiones afectadas en casi tiempo real. De tal manera apoyó con informaciones muy útiles en el manejo, la organización y distribución de primer auxilio y en la toma de decisiones.

En el futuro se espera que la Percepción Remota será una herramienta aún más fuerte y útil en la administración de desastres naturales por la disponibilidad de imágenes tomadas de manera continua y el mejoramiento de la resolución espacial y espectral de observaciones por satélite.

En consecuencia es indispensable que un país como Chile que cada día puede ser afectada por cualquier desastre natural, está preparada para enfrentar tal emergencia con herramientas adecuadas y a la altura de los avances que se ven a escala mundial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALARCON, R. *Delimitación de zonas de seguridad de la Bahía Concepción, a través de la teledetección*. Informe de Proyecto de título, 2011.
- ASTRIUM *Pléiades Satellite Imagery : Astrium Geoinformation System*. Accessed 23/05/2013. <http://www.astrium-geo.com/pleiades/>.
- BÄHR, H.-P.; Hering Coelho, A.; Leebmann, J.; Steinle, E.; Tovari, D. Geospatial Data Acquisition by Advanced Sensors in Disaster Environments. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM), *International Conference “Disaster and Society”*, 2004.
- BARRIENTOS, S. *Informe técnico actualizado 27 mayo; 2010 terremoto Cauquenes 27 febrero 2010*. pp. 20, 2010.
- BEVIS, M. *Researchers show how far South American cities moved in quake*. Accessed 25/06/2013. <http://researchnews.osu.edu/archive/chilemoves.htm>.
- CHOUDHURY, A. M. Monitoring and forecast of disasters in Bangladesh using remote sensing technology. *Asian Conference on Remote Sensing 1994*.
- CEAS Using Space Assets for Disaster Management. *CEAS Workshop on International Cooperation in Space*. 1996
- DIGITALGLOBE *DigitalGlobe – Satellite Imagery and Geospatial Information Products*. Accessed 12/05/2013. <http://www.digitalglobe.com/resources/satellite-information>.
- DLR *TerraSAR-X Hot & New*. Accessed 13/03/2011. <http://www.dlr.de/TerraSAR-X/>.
- ESA *ESA Earthnet: Synthetic Aperture Radar*. Accessed 15/03/2011. <http://earth.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=4001>
- EMA *Tuscaloosa County Emergency Management Agency (2008). The Emergency Management Cycle*. Accessed 10/01/2013. <http://www.tuscoema.org/cycle.html>.
- KAHMEN, H.; Eichhorn, A.; Haberler-Weber, M. A Multi-Scale Monitoring Concept for Landslide Disaster Mitigation. *International Association of Geodesy Symposia*. Volume 130, p. 769-775, 2007.
- NIRUPAMA, K.; SIMONOVIC, S. P. Role of remote sensing in disaster management, *ICLR Research Paper Series – No. 21*, pp. 152-160, 2002.
- MORA, I.; STAUB, G.; BÁEZ, J.C.; MONTECINO, H. Quantification of vegetation affected by volcanic ash deposits – Case study at Cordón Caulle (Chile). *IAG Scientific Assembly*, Potsdam, Germany, September 1-6, 2013.
- NASA *Landsat Data Continuity Mission*. Accessed 16/07/2013. http://ldcm.gsfc.nasa.gov/spacecraft_instruments/oli_reqs.html.
- RADARSAT *RADARSAT-2 Information*. Accessed 16/03/2011. <http://www.radarsat2.info>.
- RAPIDEYE *RapidEye :: Delivering the world*. Accessed 17/03/2011. <http://www.rapideye.de/>.

- SARAGONI, R. El mega terremoto del Maule de 2010: una lección de buena ingeniería, pero con sorpresas y nuevos desafíos. *In: Anales de la Universidad de Chile*, 1 (7), p. 35-56, 2011.
- SAF Servicio Aerofotogramétrico – *Imágenes Satelitales*. Accessed 23/05/2013. <http://www.saf.cl/index.php/productos/16-productos/45-imagenes-satelitales>.
- SMARA, Y.; AICHOUCHE BELHADJ-AISSA, A.; BELHADJ-AISSA, M. Application of GIS and Remote Sensing Technologies in Disaster Management in Algeria. *FIG Working Week 2005 and GSDI-8* Cairo, Egypt April 16-21, 2005.
- STEINBRUCH, F.; GALL, M.; JOSÉ, F. Remote Sensing and GIS for Documentation and Evaluation of the Socio-Economic and Environmental Impact of the Floods 2000 in Central Mozambique. *In: The Intl. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXIV, Part 6/W6, p. 59-65, 2002.
- STRUNZ, G.; POST, J.; ZOSEDER, K.; WEGSCHEIDER, S.; MÜCK, M.; RIEDLINGER, T.; MEHL, H.; DECH, S.; BIRKMANN, J.; GEBERT, N.; HARJONO, H.; ANWAR, H.Z.; SUMARYONO; KHOMARUDIN, R.M.; MUHARI, A. Tsunami risk assessment in Indonesia. *In: Natural Hazards and Earth System Science*, 11(1), p. 67-82, 2011.
- TEMIMI, M.; LCONTE, R.; BRISSETTE, F.; CHAOUCH, N. Flood monitoring over the Mackenzie River Basin using passive microwave data. *In: Remote Sensing of Environment*, 98 (2-3), p. 344-355, 2005.
- TONG, X; SANDWELL, D.; LUTTRELL, K.; BROOKS, B.; BEVIS, M.; SHIMADA, M.; FOSTER, J.; SMALLEY, R.; PARRA, H.; BÁEZ, J.C.; BLANCO, M.; KENDRICK, E.; GENRICH, J.; CACCAMISE, D. The 2010 Maule, Chile earthquake: Downdip rupture limit revealed by space geodesy. *In: Geophysical Research Letters*, 37 (24), p. 1944-2007, 2010.
- UDDSTROM, M.; OLIVER, H.; ANDREWS, P.; MOORE, S.; SHERLOCK, V. From weather prediction to forecasting hazards. *In: Water & Atmosphere*, 15 (3), 2007.
- VENKATESRWLU, P. Remote Sensing and GIS to combat Drought Disaster: An Indian Example. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 *IEEE International Volume 4*, p. 2294 – 2297, 2004.
- WEGSCHEIDER, S.; POST, J.; ZOSEDER, K.; MÜCK, M.; STRUNZ, G.; RIEDLINGER, T.; MUHARI, A.; ANWAR, H. Z. Generating tsunami risk knowledge at community level as a base for planning and implementation of risk reduction strategies. *In: Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(2), p. 249-258, 2011.
- XUEZHENG, Y.; RIHONG, Y.; JINFU, D. The study of Remote Sensing for Qinghai-Tibet Plateau uplift Locus. *In Proceedings: Asian Conference on Remote Sensing, 2002*. Proceedings, 2002.

(Recebido em setembro de 2013. Aceito em dezembro de 2013).