



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Instituto
Geofísico del Perú - IGP



COMPENDIO DE INVESTIGACIONES EN GEOFÍSICA

Trabajos de investigación realizados por estudiantes
durante el año 2016



Título: Compendio de Investigaciones en Geofísica
Título clave abreviado: Compend. Investig Geof.
Volumen: 17
ISSN: 2079-696X

Lima, octubre de 2016

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú Nro. 2016-13983

Editado por: Hernando Tavera
Ken Takahashi
Marco Milla
Alejandra Martínez

Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo, IV Etapa, Ate Vitarte

Impreso en: Imprenta Editora Gráfica Real SAC.
Jr. Independencia 953 – Trujillo – La Libertad
Teléfono (44) 25-3324

COMPENDIO DE INVESTIGACIONES EN GEOFÍSICA

Trabajos de investigación realizados por estudiantes durante el año 2016



índice

Prólogo.....	6
De los editores.....	7
SECCIÓN 1. CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA.....	8
ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI (MOQUEGUA) PARA EL PERIODO MAYO – SETIEMBRE DE 2014 SEISMIC ACTIVITY IN TICSANI VOLCANO REGION (MOQUEGUA) DURING MAY TO SEPTEMBER 2014 John Edward Cruz Igme.....	9
ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAGUNAS SÍSMICAS EN EL BORDE OESTE DE SUDAMÉRICA ANALYSIS AND EVALUATION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF SEISMIC GAPS IN THE OCCIDENTAL SOUTH AMÉRICA BORDER Sonia Estephanie Ramos Chura	14
DETERMINACIÓN DE ESCENARIO DE RIESGO SÍSMICO EN EL DISTRITO DE SAN ISIDRO Determination of seismic risk scenario in the district of San Isidro. Jose María Jesús Campoverde Oropeza	19
SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA Y SU APLICACIÓN PARA LA IDENTIFICACION DE ESCENARIOS DE RIESGO EN LA CIUDAD DE BARRANCA – LIMA GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM AND ITS APLICATION FOR IDENTIFYING RISK SCENARIOS IN THE CITY OF BARRANCA – LIMA Leonidas Javier Oyola Coral	25
SECCIÓN 2. CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA E HIDRÓSFERA.....	31
CARACTERIZACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO USANDO LA TÉCNICA EDDY COVARIANCE CHARACTERIZATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION IN THE OBSERVATORY OF HUANCAYO USING EDDY COVARIANCE TECHNIQUE Stephany Magaly Callañaupa Gutierrez.....	32
ESTADÍSTICAS DE OCURRECIA DE TORMENTAS EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO Moisture sources and atmospheric circulation evidenced through the isotopic signal of rain ($\delta^{18}O$ and δD) in the Alto Mayo basin Jairo Michael Valdivia Prado.....	38
ESTUDIO DE LA PRECIPITACIÓN USANDO EL MODELO WEATHER RESEARCH AND FORESCASTING (WRF) EN LA CUENCA DEL RIO MANTARO STUDY OF PRECIPITATION USING THE MODEL AND WEATHER RESEARCH FORESCASTING (WRF) IN THE MANTARO RIVER BASIN Alan Jesús García Rosales.....	43
FUENTES DE HUMEDAD Y CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA EVIDENCIADAS A TRAVÉS DE INDICADORES ISOTÓPICOS ($\delta^{18}O$ Y δD) EN LAS PRECIPITACIONES DE LA CUENCA DEL ALTO MAYO MOISTURE SOURCES AND ATMOSPHERIC CIRCULATION EVIDENCED THROUGH THE ISOTOPIC SIGNAL OF RAIN ($\delta^{18}O$ AND δD) IN THE ALTO MAYO BASIN Angela Ampuero Grández.....	48
VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE SEQUÍAS EN LA CUENCA ANDINO-AMAZÓNICA MEDIANTE ÍNDICES DE SENSORAMIENTO REMOTO SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF DROUGHT IN THE ANDEAN-AMAZON BASIN USING REMOTE SENSING INDEX Omar Efrain Gutierrez Cori.....	54
SECCIÓN 3. CIENCIAS DE LA ALTA ATMÓSFERA.....	61
ADAPTACIÓN Y MODERNIZACIÓN DE DISPOSITIVO DIVISOR DE FRECUENCIA PARA EL NUEVO SISTEMA INTEGRADO DE RADAR DEL RADIO OBSERVATORIO DE JICAMARCA ADAPTATION AND MODERNIZATION OF FREQUENCY DIVIDER DEVICE FOR THE NEW INTEGRATED SYSTEM RADAR RADIO OBSERVATORY JICAMARCA Moises Stevend Meza Rodriguez.....	62

<i>CALIBRACIÓN DE IMÁGENES DE RADAR PARA MONITOREO DE LA F_DISPERSA</i> <i>RADAR IMAGING CALIBRATION FOR MONITORING THE EQUATORIAL SPREAD-F</i> <i>Mariano Uriá Valencia</i>	67
<i>CODIFICACIÓN DE SEÑAL DE RADIO BEACON PARA CUBESAT</i> <i>CODING FOR A CUBESAT</i> <i>Juan Manuel Llanos Miranda</i>	73
<i>DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA MECÁNICA MODULAR PARA MOVIMIENTOS VERTICAL Y HORIZONTAL DEL RADAR SAR, PARA MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS</i> <i>DESIGN OF A MODULAR MECHANICAL STRUCTURE FOR VERTICAL AND HORIZONTAL MOVEMENTS OF THE SAR RADAR FOR LANDSLIDE MONITORING</i> <i>Camilo Daniel Ortecho Huamanchumo</i>	78
<i>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE RECARGA AUTÓNOMA PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO PARA EL MONITOREO DE VOLCANES</i> <i>DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN AUTONOMOUS RECHARGING STATION FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR VOLCANO MONITORING</i> <i>Alessandro Morales Saravia</i>	83
<i>ESTIMACIÓN DE VIENTOS MLT A PARTIR DE DATOS DE COLAS DE METEOROS APLICANDO LA TÉCNICA DBS</i> <i>MLT WINDS ESTIMATION BY APPLYING DBS TO METEOR TRAILS</i> <i>Oscar Adán Acevedo Sánchez</i>	88
<i>IMPLEMENTACION DE ALGORITMOS DE FORMACION DE IMÁGENES EN 2D y 3D USANDO UN RADAR DE APERTURA SINTETICA TERRESTRE</i> <i>IMPLEMENTATION OF ALGORITHMS FOR 2D AND 3D GROUND BASED SYNTHETIC APERTURE RADAR (GB-SAR) IMAGING</i> <i>Luis Saul Charapaquí Miranda</i>	93
<i>IMPLEMENTACIÓN DE SPACED ANTENNA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA PARA ESTIMACIÓN DE VIENTOS TROPOSFÉRICOS</i> <i>Implementation of Spaced Antenna technique in the frequency domain for tropospheric winds estimation</i> <i>Víctor Eduardo Vásquez Ortiz</i>	99
<i>MEJORAS AL SISTEMA DE RADAR MULTI-ESTÁTICO HF (IGP CORNELL)</i> <i>IMPROVEMENTS TO THE MULTI-STATIC RADAR SYSTEM HF</i> <i>Genaro Alberto Soriano Saaverdra</i>	106
<i>SISTEMA RECEPTOR DE DOBLE BANDA SATELITAL PARA LA ESTIMACION DEL CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES EN LA IONOSFERA</i> <i>Dual-band beacon satellite receiver to estimate ionospheric Total Electron Content (TEC)</i> <i>Josemaría Gómez Sócola</i>	112
SECCIÓN 4. GEOFÍSICA Y SOCIEDAD	118
<i>CADENA PRODUCTIVA DE Anadara tuberculosa (SOWERBY 1833) EXTRAÍDA EN EL SANTUARIO NACIONAL LOS MANGLARES DE TUMBES, 2015 JOSÉ</i> <i>Productive chain Of Anadara Tuberculosa (Sowerby 1833) extracted in the National Sanctuary of Tumbes Mangroves, 2015</i> <i>Manuel Felpe Azabache Cobeña</i>	119
<i>CAPACIDAD DE CARGA DE LOS CIRCUITOS TURÍSTICOS DEL SANTUARIO NACIONAL LOS MANGLARES DE TUMBES Y DEL CIRCUITO TURÍSTICO DE PUERTO PIZARRO, TUMBES, 2013 - 2014</i> <i>TOURIST CARRYING CAPACITY OF TOURIST CIRCUIT OF TUMBES NATIONAL MANGROVE SANCTUARY AND PUERTO PIZARRO TOURIST CIRCUIT, TUMBES 2013 - 2014</i> <i>María Roxana Prado Mendoza</i>	125
<i>IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS DE LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA PARA EL PERÍODO 1985-2014 EN LA ZONA DE AMORTIGUAMIENTO DEL SNLMT, DISTRITOS DE AGUAS VERDES Y ZARUMILLA</i> <i>IDENTIFYING IMPACTS OF AGRICULTURAL ACTIVITY FOR THE PERIOD 1985-2014 IN THE BUFFER ZONE OF SNLMT, ZARUMILLA AND AGUAS VERDES DISTRICTS</i> <i>Eduard Alder Feijoo Fox</i>	131

Prólogo

El Instituto Geofísico del Perú (IGP), por ley, tiene como una de sus funciones la formulación y desarrollo de programas educativos conducentes a la formación, capacitación, perfeccionamiento y especialización de investigadores, profesionales y técnicos en las áreas de la geofísica en coordinación con las universidades y otras instituciones de investigación pública y/o privada.

Por esta razón, el IGP ha implementado, en los últimos años, diversos programas de formación de estudiantes. En primer lugar, el instituto cuenta con un programa de tesis, mediante el cual se subvenciona a estudiantes de pre y posgrado en el desarrollo de sus tesis y se les asigna un asesor de acuerdo al ámbito y disciplina del estudio. Este programa complementa la formación universitaria con el desarrollo de capacidades científicas y sirve de semillero de los futuros investigadores en geofísica que el Perú necesita. Adicionalmente, el IGP cuenta con un programa de prácticas preprofesionales, el cual complementa la formación de jóvenes estudiantes universitarios en sus últimos años de formación.

La presente publicación tiene por objetivo la difusión de los diferentes trabajos realizados por ellos, trabajos que incluyen temas de investigación científica relacionados con ciencias de la tierra sólida, atmósfera e hidrósfera, aeronomía, astronomía, y disciplinas asociadas, así como también temas de ingeniería vinculados con desarrollo tecnológico, procesamiento de señales, tecnologías de la información, entre otros.

Desde 1999, cuando se empieza a publicar el entonces denominado “Compendio de trabajos de investigación realizados por estudiantes del IGP”, este espacio se ha convertido en la carta de presentación de la cantera de estudiantes de la institución ante la comunidad científica nacional e internacional.

En esta edición, correspondiente al volumen 17, se presentan 22 trabajos con el firme propósito de continuar siendo un aporte importante en el conocimiento y comprensión de la geofísica y ciencias afines.

Los Editores



Dr. Hernando Tavera

Doctor en Ciencias Físicas – Mención Sismología de la Universidad Complutense Madrid, España y Geofísico de la Universidad San Agustín de Arequipa. Actualmente es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú donde está a cargo de la Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida, y Director Ejecutivo del Centro Regional de Sismología para América del Sur. Además, es investigador principal del proyecto “Escenarios de Sismos y Tsunamis en el Borde Occidental del Perú”. Recientemente su investigación está a proponer escenarios del comportamiento dinámico de los suelos a la ocurrencia de sismos de gran magnitud e intensidad. Participa activamente en los Comités Técnicos de la PCM, Indeci y Cenepred.



Dr. Marco Milla

Ph. D. en Ingeniería eléctrica y de computadoras de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, EE.UU. e Ingeniero Electrónico de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Actualmente es investigador científico del Instituto Geofísico del Perú y tiene a su cargo la dirección del Radio Observatorio de Jicamarca, sede científica del IGP IGP dedicado al estudio de la alta atmósfera y ionosfera ecuatorial. Su investigación involucra el desarrollo de técnicas de radar de dispersión incoherente para la medición de parámetros físicos de la ionósfera de forma remota. En particular, se ha dedicado al estudio de los efectos de colisiones de Coulomb y efectos de propagación magneto-iónica en las mediciones que realiza con el radar ionosférico de Jicamarca.



Dr. Ken Takahashi

Ph. D. en Ciencias Atmosféricas de la University of Washington, Seattle, EEUU y físico de la Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP). Actualmente es investigador científico en el Instituto Geofísico del Perú, donde está a cargo de la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera, y representa al IGP en el Comité Técnico del ENFEN. Recientemente su investigación está enfocada en entender las condiciones que favorecen la ocurrencia de eventos El Niño extremos, los procesos de interacción entre el océano y atmósfera, identificar la variabilidad a escala decadal en Pacífico sureste



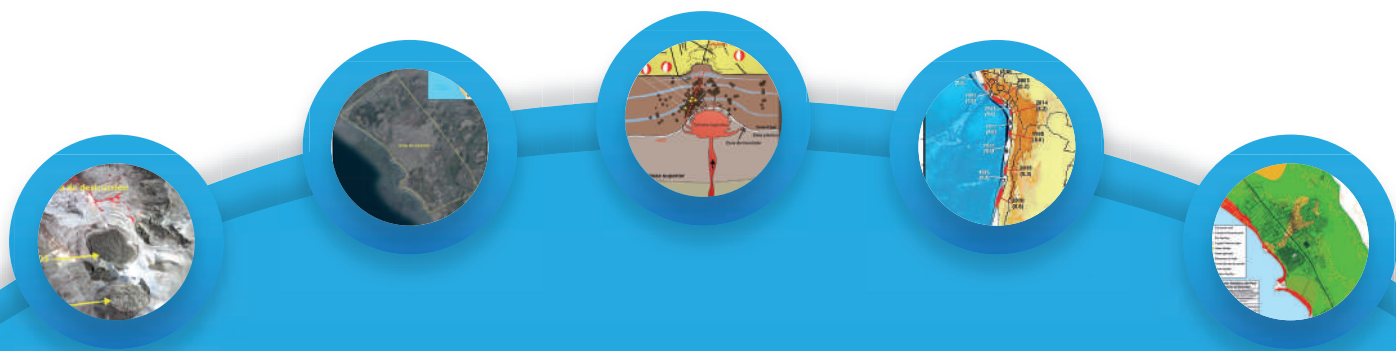
Mag. Alejandra Martínez

Magister en Ecología y Gestión Ambiental de la Universidad Ricardo Palma y Economista de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Actualmente es responsable de la Subdirección de Geofísica y Sociedad e investigadora científica del Instituto Geofísico del Perú. Recientemente, sus estudios están enfocados en los impactos socioeconómicos de los fenómenos geofísicos en la sociedad y su desarrollo, especialmente en los temas de vulnerabilidad, adaptación y gestión de desastres naturales.



EDITORES

Ciencias de la Tierra Sólida



Sección **01**

ACTIVIDAD SÍSMICA EN LA REGIÓN DEL VOLCÁN TICSANI (MOQUEGUA) PARA EL PERIODO MAYO – SETIEMBRE DE 2014

SEISMIC ACTIVITY IN TICSANI VOLCANO REGION (MOQUEGUA) DURING MAY TO SEPTEMBER 2014

John Edward Cruz Igme

Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa
Facultad de Geología, Geofísica y Minas
Join3h@hotmail.com

Asesor: Dr. Orlando Macedo

Observatorio Vulcanológico del Sur
IGP

Resumen

En el presente trabajo se realiza el análisis de datos sísmicos sobre la región del volcán Ticsani (periodo mayo - setiembre de 2014) respecto a su forma de onda, contenido espectral y tiempos de arribo de fases a fin de caracterizar los tipos de señales sísmicas, obtener parámetros hipocentrales y cálculo de mecanismos focales. En el periodo de estudio se registraron 2230 sismos asociados a fractura de rocas con magnitudes entre 0.6 y 3.3 ML. La red sísmica compuesta por cuatro estaciones temporales permitió obtener registros necesarios para localizar 334 sismos de fractura distribuidos entre los 3 km y 14 km de profundidad y ubicados en su mayoría debajo del domo reciente y a 3 km al sur de dicho domo. Por otra parte, se ha efectuado también el cálculo de mecanismos focales que muestran fallamientos de tipo extensivo, con planos orientados en dirección N-S principalmente y ejes de tensión E-O. Se han registrado hasta dos enjambres de sismos de fractura, observados también en los análisis realizados en registros del año 2005. Tal sismicidad en enjambre constituye una muestra de la actuación de una componente volcánica que se suma a los esfuerzos preexistentes en esta región.

Palabras clave: sismos de fractura, enjambre sísmico, hipocentro, datos sísmicos.

Abstract

In this paper we analyzed seismic data recorded on the Ticsani volcano region from May to September 2014. We studied the waveforms and its spectral content in order to characterize the types of seismic signals, and we also determined location of hypocenters and calculated focal mechanisms. During this study 2230 earthquakes of magnitudes from 0.6 to 3.3 ML were recorded, all these earthquakes have been associated to fracture of rocks. The seismic network composed of four temporary stations allowed to locate 334 earthquakes distributed between 3 km and 14 km deep and located mostly below and 3 km south of the recent dome. Moreover, it has also made the calculation of focal mechanisms which show tension motions, with planes oriented N-S direction and E-O extension axes. During our study we recorded two swarms of earthquakes, similar to the earthquakes recorded in 2005 in the same zone. Such seismicity of swarm type is a proof of the presence of a volcanic component which adds to the existing stress in this region.

Keywords: fracture of rocks, swarm type earthquakes, hypocenter, seismic data.

1. Introducción

El volcán Ticsani ($16^{\circ}45'3''\text{S}$, $70^{\circ}36'13''\text{O}$ 5133 msnm) es un estrato volcán perteneciente a la Zona Volcánica Central de los Andes. Se encuentra ubicado a 60 km al noreste de la ciudad de Moquegua, pertenece al grupo volcánico Ubinas-Huaynaputina-Ticsani (Lavallée et al., 2009), constituido por un complejo de domos (D1, D2, D3) de lavas andesíticas a dacíticas y una caldera de destrucción (Fig. 1). La más reciente erupción del volcán Ticsani ocurrió hace menos de 400 años (Siebert et al., 2010), con un IEV entre 2 y 3 de tipo freatomagmática; en esa ocasión se emplazó el domo D3.

El volcán Ticsani presenta una actividad hidrotermal importante, representada por surgentes de agua y vapor, que se distribuyen al NO, E y SO del volcán en un radio de 9km. La zona del volcán Ticsani ha presentado sismicidad importante en los últimos años, que en general han sido asociados a la tectónica local (Aguilar et al., 2001; Tavera, 2006).

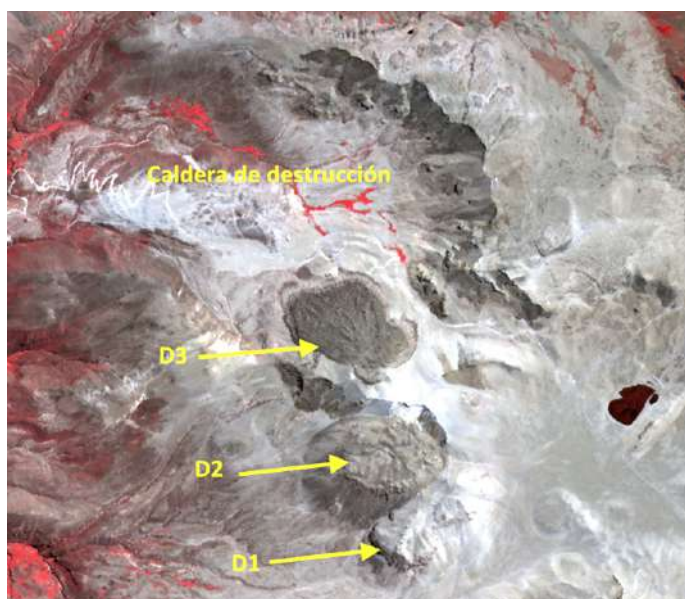


Figura 1. Mapa de ubicación de la ciudad de Huacho.

2. Red sísmica

El OVS-IGP decidió efectuar un estudio de la actividad sísmica, así como iniciar el monitoreo permanente del volcán Ticsani, para lo cual instaló una red de 5 estaciones sísmicas temporales (SOQ, PAL, CHT, HTR y TCN) en colaboración con la Universidad de Liverpool (Fig.2). Los instrumentos utilizados fueron sensores Lennartz LE-3D /1S LITE (1 Hz y 3C), 4 digitalizadores DATA CUBE3 y un digitalizador Guralp DM-24, dispuestos en un radio de 25 km del volcán. Los datos corresponden al periodo del 01 de mayo al 29 de setiembre del 2014. En la tabla 1 detallan las coordenadas geográficas y UTM de los cinco puntos elegidos para la instalación de las estaciones así como su elevación y código de estación.

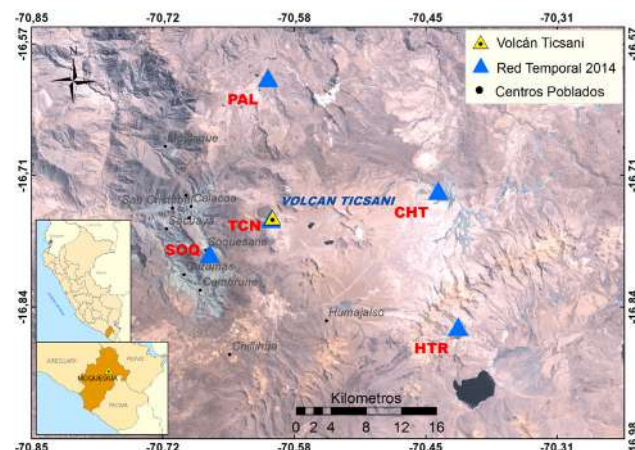


Figura 2. Mapa de distribución de estaciones sísmicas en la región del volcán Ticsani.

Tabla 1. Coordenadas de las estaciones sísmicas, región del volcán Ticsani.

RED TICSANI 2014						
Coordenadas (datum WGS-84 Zona 19k)						
ESTACIÓN	CÓDIGO	GEOGRÁFICAS		NORTE	ESTE	ALTURA m.s.n.m.
Huaytire	HTR	-70.413°	-16.862°	8135122.83	349471.52	4573
Pallatea	PAL	-70.608°	-16.607°	8163181.54	328424.24	4406
Chillota	CHT	-70.434°	-16.723°	8150513.08	347168.43	4349
Soquesane	SOQ	-70.668°	-16.788°	8143167.27	322218.14	3713
Ticsani	TCN	-70.605°	-16.752°	8147185.30	328877.30	5133

3. Metodología

El primer paso para la realización de este estudio fue la adquisición de datos sísmicos realizado mediante la campaña temporal Ticsani 2014. Una vez adquiridos los datos en formatos de origen (CUBE) fueron transformados al formato Mseed y posteriormente al formato SAC mediante herramientas computacionales. El análisis de datos se realizó mediante las formas de onda, espectro de frecuencias y espectrogramas; para lograr el cálculo de los parámetros hipocentrales fue necesario utilizar programas Hypoellipse (Lahr, J. 1999), así mismo el cálculo de mecanismos focales se realizó mediante el paquete SEISAN (Havskov, 1997). Finalmente Con los resultados obtenidos se realiza la interpretación, sugiriéndose un modelo explicativo de la sismicidad encontrada (Fig. 3).

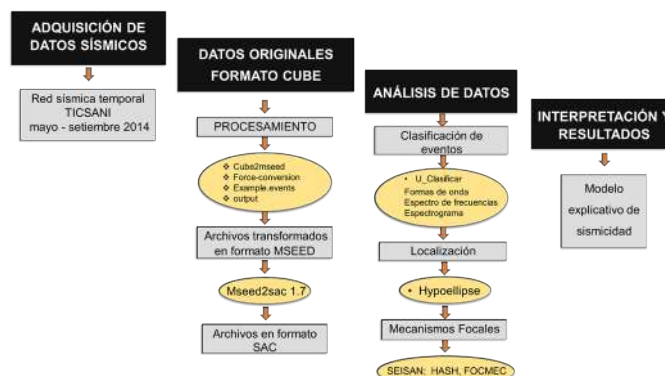


Figura 3. Esquema de metodología empleada para este estudio.

4. Resultados y discusión

4.1. Sismos característicos y localización de eventos

Sismos de fractura de rocas. Los sismos característicos encontrados en la zona de estudio son principalmente de fractura de rocas, los registros sísmicos permitieron la clasificación de 2112 eventos representando el 95% de los sismos clasificados, estos eventos se caracterizan por ser de tipo impulsivo, con claros arribos de las fases P y S, además de presentar una amplia banda espectral (Figura 4).

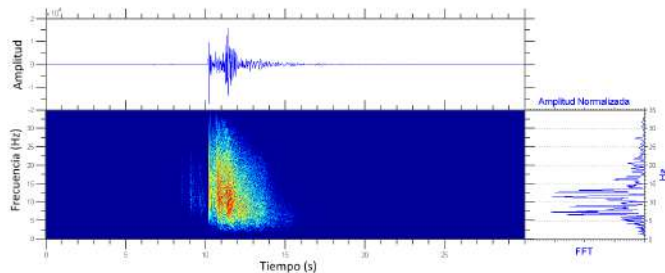


Figura 4. Ejemplo de sismo de fractura registrado por la estación SOQ el 26 de junio a las 08:54hrs (UTC). Se muestra su forma de onda (arriba), espectrograma (abajo) y su espectro de frecuencias (derecha).

Sismos de baja frecuencia. Los eventos clasificados bajo esta categoría (118 eventos) son de tipo emergente en sus inicios y presentan un decaimiento lento en su coda. El espectro frecuencias se encuentra por debajo de los 5 hz y fueron registrados principalmente por la estación TCN, estación instalada sobre el domo D3 (Domo reciente). Ver Figura 5.

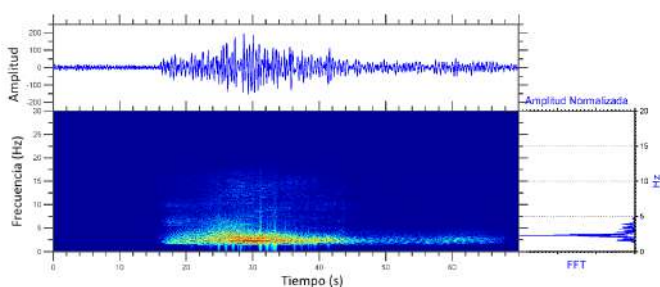


Figura 5. Ejemplo de sismo de baja frecuencia registrado por la estación TCN el 24 de Agosto a las 17:24hrs (UTC). Se muestra su forma de onda (arriba), espectrograma (abajo) y su espectro de frecuencias característico (derecha).

Parámetros hipocentrales. Fueron calculados para 334 sismos de fractura con magnitudes entre 0.6 ML y 3.3 ML, así mismo presentaron fases P-S identificables. Los resultados fueron de calidad A y B en la precisión del epicentro y de la profundidad focal (A significa un error ≤ 1.34 km; B un error ≤ 2.67 km). En la distribución espacial se observa una notable concentración de focos a proximidad del domo D3, extendiéndose en dirección a los domos D2 y D1. En el mapa y los perfiles E-W y N-S de la figura 6 se ha planteado los 334 sismos, los cuales están distribuidos entre los 2,5 y 14 km de profundidad. Considerando

que en un estudio reciente Lavallée et al. (2009) identificó plenamente una importante falla F2 que cruza a los tres domos, debido a esta falla hemos levantado un perfil sísmico B-B' perpendicular a la misma. En este perfil se observa que la sismicidad sigue un alineamiento con buzamiento de 70° al oeste (Fig. 7).

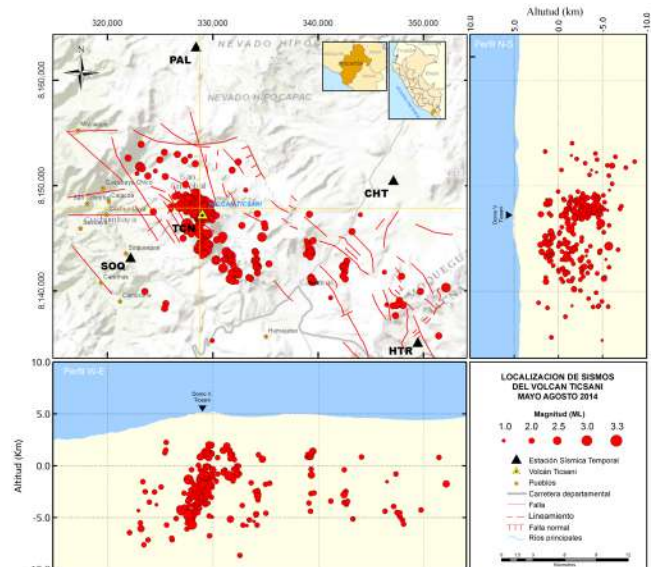


Figura 6. Mapa de distribución de sismicidad en superficie y en profundidad; se observa un agrupamiento de sismos por debajo del volcán. Rasgos estructurales modificado de Lavallée et al., (2009), Gonzales (2009) y Carlotto, (2009).

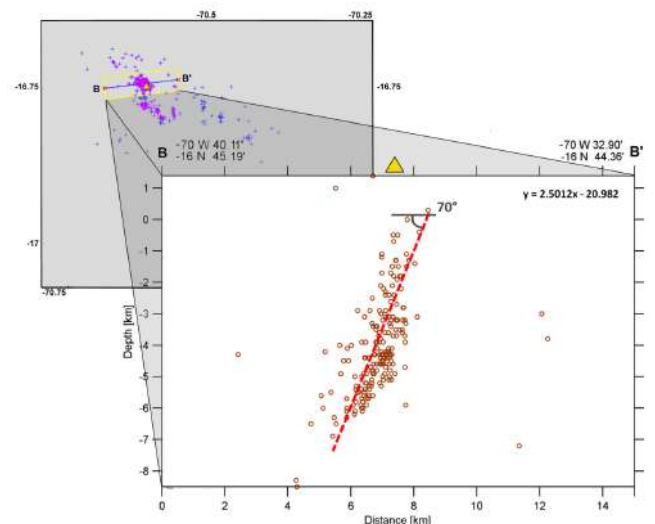


Figura 7. Perfil sísmico B-B' que cruza al domo D3. La sismicidad se agrupa próxima a una línea que se inclina de 70° hacia el oeste.

4.2. Mecanismos focales

Los datos sísmicos recabados tanto de la red temporal Ticsani 2014 (OVS-IGP), como de la red nacional de estaciones del IGP, han permitido también determinar mecanismos focales para cuatro sismos, dichos eventos se encontraron ubicados a proximidad del domo D3. Las soluciones de mecanismos focales obtenidas son equivalentes a fallamiento esencialmente de tipo normal con planos orientados en dirección Norte-Sur, también

se observan mecanismos focales de carácter normal con cierta componente transcurrente (Fig. 8).

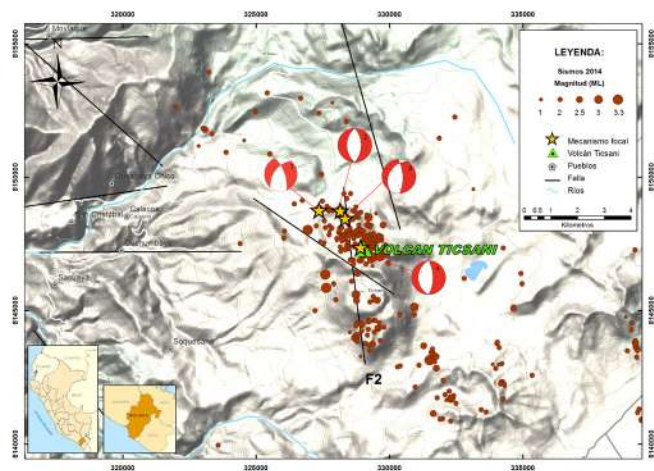


Figura 8. Mapa sísmico y mecanismos focales de los principales sismos. Se observa también las fallas determinadas por Lavallée et al (2009), donde destaca la falla F2.

4.3. Ocurrencia de enjambres sísmicos

Aunque durante el periodo de registro se registraron numerosos sismos de fractura, dos días destacaron por presentarse en forma de enjambre. Dichos enjambres presentaron magnitudes menores a 3,3 ML. El primero, localizado en el domo D3, ocurrió el 24 de junio entre las 3 y 17 hrs (UTC), y el segundo el 26 de setiembre entre las 2 y 9 hrs (UTC) fue ubicado a 4.5km al SSE de D3 (cercañas de D1). En complemento de este estudio se realizó el análisis de los sismos registrados el año 2005, al revisar la sismicidad ocurrida ese año se encontró que su ocurrencia también se dio en enjambre. Por el contrario, los sismos analizados para el año 1999 dan muestra de una ocurrencia que corresponde a una típica sismicidad de tipo tectónico (mainshock-aftershock) (Fig. 9).

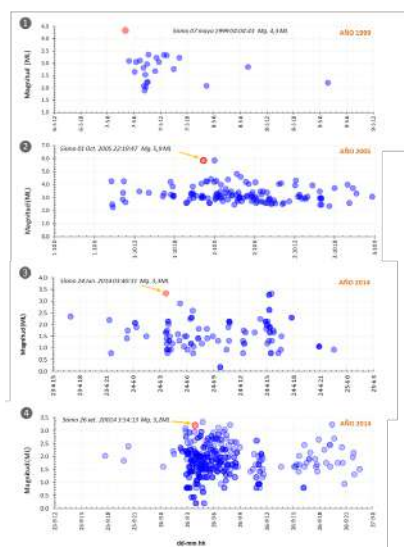


Figura 9. Tipos de sismicidad en la región del volcán Ticsani. (1) Secuencia mainshock-aftershock de mayo 1999. (2) Enjambre sísmico (136 eventos) de octubre 2005. (3) Enjambre (99 eventos) de junio 2014. (4) Enjambre (440 eventos) de setiembre 2014.

4.4. Modelo propuesto según la sismicidad registrada

Tomando como base el modelo de Fournier (1999) se elabora un esquema para explicar la ocurrencia de los enjambres sísmicos. La sismicidad en enjambres es común en regiones próximas a volcanes activos (White, 2011; Zobin, 2012). La diferencia principal entre un evento de procedencia tectónica y volcánica radica en la ocurrencia frecuente de enjambres sísmicos los cuales no siguen la usual distribución main-after-shock (McNutt, 2000). Para el caso del volcán Ticsani, se observa que en los últimos 10 años hasta en tres oportunidades, ha ocurrido súbita sismicidad que duró horas o pocos días (Fig. 9), posiblemente generada o favorecida por ingreso abrupto de fluidos hidrotermales y/o volcánicos en el sistema de fallas y fisuras de la zona, causando cambios en el estado de equilibrio de esfuerzos tectónicos de la región. La principal falla afectada sería la falla F2 estudiada por Lavallée et al (2009), para la cual este estudio ha determinado un buzamiento de 70° en dirección oeste. La figura 10 resume la sismicidad en relación a una posible estructura en la zona del volcán Ticsani.

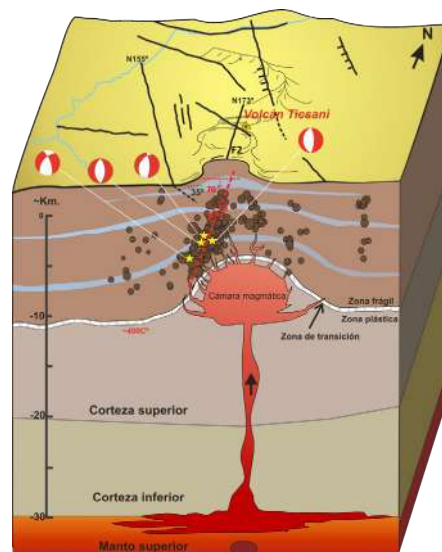


Figura 10. Esquema a partir de Fournier 1999 el cual explica la generación de los sismos de fractura debido a la presión de fluidos termales y/o volcánicos, y la interacción con una falla activa de tipo extensional, teniendo como resultado los enjambres sísmicos.

5. Conclusiones

La sismicidad dominante en la región del volcán Ticsani es de tipo fractura. En el periodo de observación se registró un total de 2230 sismos, de los cuales 2112 sismos (95%) son de fractura. Se registraron también 118 eventos de baja frecuencia. En la determinación de los parámetros hipocentrales (334 eventos, con claras fases P y S, y de magnitudes de 0.6ML a 3.3ML) se observa que los sismos se concentran siguiendo el alineamiento de los tres domos, con un mayor número de sismos cerca a los domos D3 (domo reciente) y D1. La distribución

hipocentral muestra un alineamiento con buzamiento de 70° al oeste.

Los mecanismos focales de sismos ubicados sobre el domo reciente son de tipo normal. Su ubicación y movimiento están acorde con la falla F2 estudiada por Lavallée et al (2009).

Una importante particularidad en los sismos de fractura registrados es que han ocurrido en enjambre. Dos enjambres sísmicos ocurrieron durante el estudio. El 24 de junio 2014 un primer enjambre de 99 eventos ocurrió próximo al domo D3. El 26 de setiembre ocurrió el segundo enjambre de 440 eventos a proximidades del domo D1. Nueve años antes, en octubre 2005, se observó también enjambres sísmicos.

Para explicar la sismicidad que está ocurriendo en la zona del volcán Ticsani, proponemos que los eventos de fractura, en enjambre, ocurren como consecuencia de un abrupto ingreso de fluidos hidrotermales y/o volcánicos en la zona de la falla F2, causando cambios en el estado de equilibrio de esfuerzos tectónicos en esta región alto andina.

6. Recomendaciones

Tanto los registros sísmicos de los últimos 15 años así como los obtenidos en el marco de este estudio evidencian actividad sísmica permanente en la zona del volcán Ticsani. Por lo tanto, es necesario que este volcán sea monitoreado permanentemente, para lo cual se debe instalar un sistema de monitoreo sísmico telemétrico que conste de al menos cuatro estaciones sísmicas, y en donde una de ellas sea ubicada sobre el mismo domo D3 del volcán, y las otras tres sean instaladas con una buena distribución azimutal y situadas entre 10 y 20 km de distancia. Es importante continuar con el monitoreo de la sismicidad, poniendo énfasis en obtener registros mediante sismómetros de banda ancha. El objetivo debe ser de detectar y localizar los sismos de fractura y los enjambres sísmicos, pero también hacer un seguimiento de la tasa de sismos asociados al paso de fluidos tanto en número como en cuanto a su energía.

Complementar los estudios sismológicos mediante la obtención de una tomografía sísmica de toda la zona que ocupa el volcán. Los resultados deben ayudar a determinar la ubicación de las principales estructuras y muy probablemente la cámara magmática. Además, puede dar información complementaria para delimitar el sistema hidrotermal en complementación con métodos geofísicos eléctricos.

7. Agradecimientos

Al Observatorio Vulcanológico del Sur perteneciente al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis. A mi asesor el Dr. Orlando Macedo y a todo su equipo por toda la paciencia y disposición que me brindaron.

8. Bibliografía

Aguilar, V., Tavera, H., Bernal, I., Palza, H., & Kosaka, R. (2001). Análisis y evaluación del sismo de Calacoa (Omate - Moquegua) del 6 de Mayo de 1999 (MW=4.0). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú* v. 91 (2001) p.69-80.

Carlotto, V. (2009). Puesta en evidencia de fallas activas mediante fotografías aéreas en la región de Huaytire-Laguna Suches, Moquegua, Sur del Perú. *Archivo técnico INGEMMET*, 5p.

Fournier, R., (1999) *Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into Brittle rock in the Magmatic-Epithermal environment. Bulletin Society of Economic Geologists*, p. 1205-1208.

Havskov, Jens, & Lindholm, C. (1997). *The Seisan Earthquake Analysis Software for the IBM Pc and Sun. Version 6.0. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Norway.*

Lahr, J. (1999) *Hypoellipse user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, On-Line Edition.*

Lavallée, Y., De Silva, S., Salas, G., & Byrnes, J. (2009). Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Ticsani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 186 (2009) 253–264.

McNutt, S. (2000). *Volcanic seismicity, Encyclopedia of Volcanoes. Ed. H. Sigurdsson, Academic Press, San Diego, Pp. 1015-1034.*

Siebert et al (2010). "Volcanoes of the world". Third edition. Smithsonian Institution, University of California Press.

Tavera, H. (2006). Características sismotectónicas de la crisis sísmica de octubre del 2005 en la región del volcán Ticsani (Moquegua). *Instituto Geofísico del Perú, Lima.*

White R. (2011) "Monitoring volcanoes and forecasting eruptions". *Volcano Observatory Best Practices Workshop: Eruption Forecasting, 11-15 September 2011, Erice, Italy.*

Zobin, V. (2012) *General Properties of Volcano-Tectonic Earthquake Swarms. Introduction to Volcanic Seismology. Second edition, pp. 144-160. Elsevier, 482 p.*

Gonzales, K., Froger, J.-L., Audin, L., & Macedo, O. (2009). Ejemplos de deformación producto de la tectónica extensiva en las zonas de Huambo-Cabanaconde en Arequipa y Calacoa-Huaytire en Moquegua, de los Andes Centrales vistos por interferometría Radar – Insar. *Sociedad Geológica del Perú SGP.*

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAGUNAS SÍSMICAS EN EL BORDE OESTE DE SUDAMÉRICA

ANALYSIS AND EVALUATION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF SEISMIC GAPS IN THE OCCIDENTAL SOUTH AMERICA BORDER

Sonia Estephanie Ramos Chura
Universidad Nacional de San Agustín
Facultad de Geología, Geofísica y Minas
ramoschurasonia@gmail.com

Asesor: Dr. Hernando Tavera
Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
IGP

Resumen

En el presente estudio se ha utilizado información contenida en los catálogos sísmicos de Colombia, Ecuador, Perú y Chile (1500 al 2015), para analizar y evaluar la distribución espacial de las áreas de ruptura presentes en el borde Occidental de Sudamérica, a fin de identificar la presencia de las denominadas “lagunas sísmicas”. Los resultados muestran que en el Borde Occidental de Sudamérica existen hasta 8 lagunas sísmicas que en el futuro darían origen a sismos de gran magnitud. Estas lagunas sísmicas se encuentran entre las áreas de ruptura de los siguientes sismos: hacia el extremo Norte del terremoto de 1979 en Colombia (440 km.de longitud); entre los sismos de 1979 y 2007 abarcando todo la costa del Ecuador y zona Norte y Centro del Perú (1332 km.de longitud); entre los sismos de 2007 y 2001 en el extremo Sur del Perú (200 km.de longitud); entre los sismos del 2001 y 2014 al Sur del Perú y Norte de Chile (100 km.de longitud); entre los sismos de 2014 y 1995 al Norte de Chile (350 km.de longitud); entre los sismos de 1995 y 2015 al Norte y parte Central de Chile (570 km.de longitud); entre los sismos del 2015 y 2010 al Centro de Chile (200 km.de longitud); y finalmente, al Sur del terremoto de Chile del 2010 (más de 1000 km.de longitud). Esta última involucra a la gran laguna sísmica del terremoto de 1960 (9.5 Mw).

Palabras clave: laguna sísmica, distribución espacial, área de ruptura, sismo.

Abstract

In the present study we used information contained in the seismic catalogs Colombia, Ecuador, Peru and Chile (1500 to 2015) to analyze and evaluate the spatial distribution of areas of rupture present in the Occidental South América border, so identifying the presence of the named “seismic gaps”. The results show that in the Occidental South América border exist up to 8 seismic gaps, that in the future would give rise to major earthquakes. These seismic gaps are among the areas of rupture of the following earthquakes: north end of the 1979 earthquake in Colombia (440 km.de length); between earthquakes of 1979 and 2007 covering all the coast of Ecuador and Peru North and Center zone (1332 km.de length); between 2007 and 2001 earthquakes in the southern end of Peru (200 km.de length); between 2001 and 2014 earthquakes in southern Peru and northern Chile (100 km.de length); between 2014 and 1995 earthquakes in northern Chile (350 km.de length); between 1995 and 2015 earthquakes in the North and Central part of Chile (570 km.de length); between 2015 and 2010 earthquakes Center Chile (200 km.de length); and finally, south of the earthquake in Chile of 2010 (over 1000 km.de length). The latter involves the great seismic gap the 1960 earthquake (Mw 9.5).

Keywords: seismic gap, spatial distribution, break area, earthquake.

1. Introducción

El borde oeste de Sudamérica constituye una de las fuentes sismogénicas mas importantes del mundo debido a la alta velocidad con la que convergen las placas de Nazca y Sudamericana, 8cm/año (DeMets et al, 1990; Norabuena et al, 1999). Este proceso genera un alta índice de sismicidad, que a nivel global, ha permitido identificar la ubicación de las regiones sísmicamente más activas. Históricamente en estas regiones, han ocurrido grandes sismos que a la fecha no se repiten y que estarían acumulando energía que puede liberarse en cualquier momento. Después de ocurrido los terremotos de Chile del 2010 y Japón del 2011, se ha hecho de gran importancia el identificar espacialmente la ubicación de las áreas que no liberaron energía, hoy conocidas como “Lagunas Sísmicas”. El concepto de laguna sísmica fue establecido en los primeros de Kelleher, J. (1972) y posteriormente analizados por Nishenko, S. (1985). Se define como laguna sísmica a la región o área que en un periodo de tiempo mayor a una centuria, no se han producido sismos.

Por otro lado, la ocurrencia continua de sismos en el borde occidental de Sudamérica, juega un rol importante en los diversos procesos sismotectónicos que se producen en el tiempo, ya sea por la deformación de las rocas, formación de fallas, fenómenos precursores de grandes sismos o la ruptura sísmica. En general, el proceso de convergencia de placas y la ocurrencia de sismos, han dado como resultado; desde el punto de vista geodinámico, la formación de la Cordillera de los Andes, pudiendo establecer la hipótesis de que los grandes sismos ocurren donde hay cordilleras, y este es el caso del borde Occidental de Sudamérica. Aquí la ocurrencia de sismos es continua en el tiempo y de acuerdo a la profundidad de sus focos, pueden ser clasificados en superficiales, intermedios y profundos (Figura 1)

• Sismos con Foco Superficial

En la Figura 1(a), se observa que los sismos con foco superficial se distribuyen en su mayoría entre la fosa y la línea de costa, a lo largo de todo el borde Occidental de Sudamérica, siendo esta zona en donde se producen la mayor parte de los sismos de magnitud elevada con relativa frecuencia. La sismicidad que presenta esta zona, puede estar asociada principalmente al proceso de subducción en sus primeros niveles de profundidad.

• Sismos con Foco Intermedio

En la Figura 1(b), se muestra el mapa con los sismos de foco intermedio, todos distribuidos mayormente en el interior del continente, formando

grupos a lo largo de la línea de costa y la cordillera Andina. Esta sismicidad está relacionada con los procesos de fricción y deformación interna de la placa de Nazca, dentro del proceso de subducción.

• Sismos con Foco Profundo

En la Figura 1(b), se observa la distribución de los sismos con foco profundo, los cuales se presentan en menor cantidad con relación a los de foco intermedio y superficial. Se distribuyen formando 3 grupos, el primero en el límite Perú-Brasil, el segundo cerca al límite Perú-Bolivia, y el tercero sobre el territorio de Argentina y Chile.

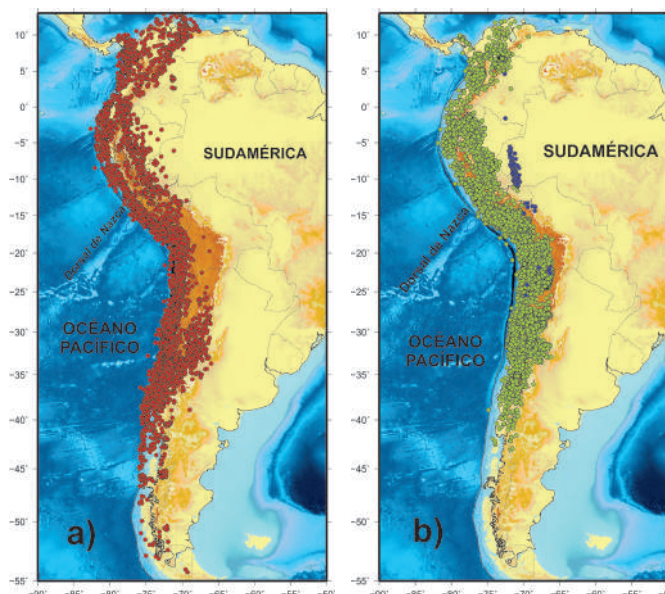


Figura 1. Distribución espacial de los sismos: a) foco superficial ($M_w \geq 4.0$), b) focos intermedios y profundos ($M_w \geq 4.0$), en el borde Occidental de Sudamérica.

2. Áreas de Ruptura

La continua ocurrencia de sismos de gran magnitud frente al borde Occidental de Sudamérica, ha permitido a través de la historia evaluar el gran potencial que presenta esta principal fuente sismogénica. Desafortunadamente, en los diferentes catálogos sísmicos, sólo se encuentra información reciente no siendo posible disponer de una base de datos suficiente como para intentar realizar estudios estadísticos que permitan tener resultados con un alto grado de confiabilidad, sobre todo para analizar los procesos de recurrencia. Sin embargo desde el punto de vista observacional es posible proyectar sobre un mapa los epicentros y áreas de ruptura de grandes sismos históricos, para identificar la presencia de posibles lagunas sísmicas. En la Tabla 1 se presenta los parámetros hipocentrales y valores de magnitud de los sismos más importantes (magnitudes ≥ 8) ocurridos en el borde occidental de Sudamérica desde el año 1500 a la fecha.

Tabla 1. Parámetros hipocentrales de los grandes sismos ocurridos en el Borde Oeste de Sudamérica desde el año 1500 ($M_w \geq 8$), según Silgado (1978), Dorbath et al (1990), Comte y Pardo (1991), Beauval et al., (2012), hasta la actualidad.

AÑO	Lat.	Long.	Prof.	M (M_w)	Lr (km)	País
08/02/1570	-36.80	-73.00	--	8.3	170	Chile
16/12/1575	-39.80	-73.20	--	8.5	430	Chile
10/07/1586	-12.20	-72.00	--	8.1	175	Perú
24/11/1604	-17.00	-70.90	30.0	8.7	450	Perú
16/09/1615	-18.50	-70.50	--	8.8	180	Chile
13/05/1647	-35.00	-72.00	--	8.5	360	Chile
15/03/1657	-36.83	-73.03	--	8.0	140	Chile
20/10/1687	-13.20	-76.50	--	8.4	300	Perú
08/07/1730	-33.05	-71.63	--	8.7	500	Chile
25/05/1751	-36.83	-73.03	--	8.5	320	Chile
29/10/1746	-11.90	-77.10	--	8.6	500	Perú
13/05/1784	-16.50	-72.00	--	8.0	300	Perú
11/04/1819	-27.35	-70.35	--	8.3	320	Chile
19/11/1822	-33.05	-71.63	--	8.5	200	Chile
20/02/1835	-36.83	-73.03	--	8.5	190	Chile
07/11/1837	-39.80	-73.20	--	8.0	280	Chile
13/08/1868	-18.20	-70.80	25.0	9.0	500	Perú
09/05/1877	-21.00	-70.30	--	9.0	500	Chile
31/01/1906	-0.96	-79.37	20.0	8.8	500	Ecuador/Colombia
16/08/1906	-32.40	-71.40	35.0	8.2	250	Chile
10/11/1922	-28.29	-69.85	25.0	8.5	340	Chile
01/12/1928	-35.00	-72.00	--	8.3	230	Chile
24/01/1939	-36.12	-72.12	60.0	8.3	200	Chile
24/05/1940	-11.09	-77.49	50.0	8.2	180	Perú
24/08/1942	-14.82	-74.71	33.0	8.2	200	Perú
06/04/1943	-30.75	-72.00	55.0	8.2	320	Chile
22/05/1960	-39.50	-74.50	25.0	9.5	1000	Chile
17/10/1966	-10.67	-78.23	37.0	8.1	100	Perú
03/10/1974	-12.20	-77.50	21.0	8.1	140	Perú
12/12/1979	1.62	-79.42	24.3	8.2	205	Ecuador/Colombia
03/03/1985	-33.14	-71.87	33.0	8.0	120	Chile
30/07/1995	-23.34	-70.29	45.6	8.0	180	Chile
23/06/2001	-16.27	-73.64	29.0	8.2	350	Perú
15/08/2007	-13.39	-76.60	39.0	8.0	160	Perú
27/02/2010	-36.12	-72.90	30.0	8.8	450	Chile
01/04/2014	-19.61	-70.77	38.9	8.2	150	Chile
16/09/2015	-31.57	-71.67	22.4	8.3	225	Chile

2.1. Siglos XVI, XVII, XVIII

En la Figura 2, se observa que durante el periodo de 1500 a 1600 (Siglo XVI), ocurrieron 3 sismos, uno frente a la costa central del Perú, y 2 frente a la costa sur de Chile, estando el resto del borde Oeste de Sudamérica en situación de acumulación de energía. Las longitudes de estas áreas de ruptura oscilan entre los 170 y los 430 km.

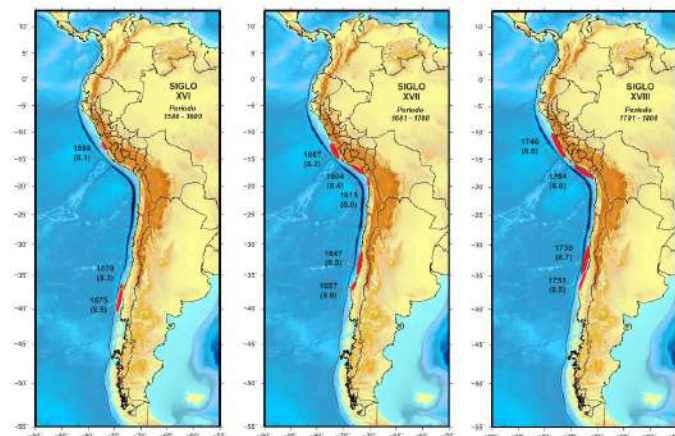


FIGURA 2. Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XVI, XVII y XVIII

Durante el periodo de 1601 a 1700 (Siglo XVII), se producen hasta 5 sismos, 3 de ellos en extremo Sur del Perú y Norte de Chile y los otros 2 en la parte Central de Chile. Estos sismos presentan áreas de ruptura que van desde los 140 a 450 km. y que ocurrieron en zonas que podrían haber sido identificados como lagunas sísmicas en el periodo anterior.

Para el periodo de 1701 a 1800 (Siglo XVIII), se tiene la ocurrencia de 4 sismos, los cuales habrían ocurrido casi en las mismas zonas en donde se produjeron los sismos anteriores, con la diferencia que estos últimos poseen áreas de ruptura que van desde los 300 a 500 km. Durante este periodo se produjeron 2 grandes sismos en el Perú, ambos produjeron tsunamis con olas que habrían alcanzado los 17 metros de altura.

2.2. Siglos XIX, XX, XXI

En la Figura 3, se observa que durante el Siglo XIX (periodo 1801 a 1900), se produjeron 6 sismos de los cuales, los más grandes ocurrieron en la región Sur del Perú, como el sismo del 13 de Agosto de 1868 y del 5 de Octubre de 1877 al Norte de Chile, ambos con magnitudes M_w de 9.0 aproximadamente.

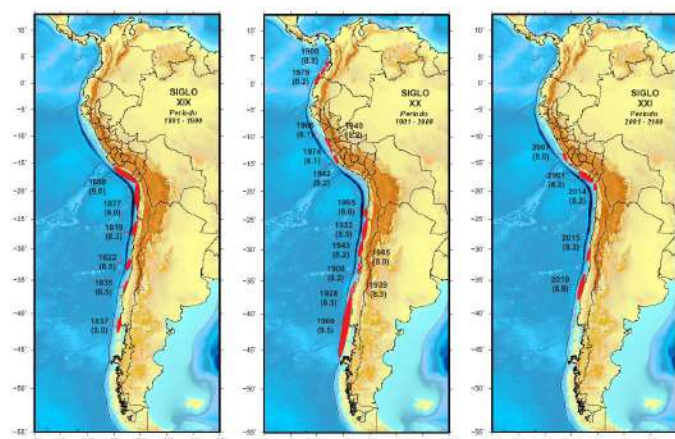


Figura 3. Distribución de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los siglos XIX, XX y XXI

Durante el Siglo XX (periodo 1901 al 2000), ocurrió un sismo de magnitud Mw de 8.8 en la zona de Ecuador limite con Colombia, además del gran terremoto de Chile de 1960, quizás el más grande para el cual se ha tenido información sísmica instrumental (magnitud Mw de 9.5). También se observa la presencia de importantes lagunas sísmicas en la región Norte y Sur del Perú, y Norte de Chile.

En el presente siglo XXI se han producido 5 sismos de los cuales, 2 de ellos ocurrieron en el Sur del Perú, el 2001 en la ciudad de Arequipa con una magnitud Mw de 8.2 (Tavera et al, 2002; Giovanni et al, 2002) y otro en el 2007 en la localidad de Pisco, con una magnitud Mw de 8.0. Los otros 3 sismos ocurrieron uno al Norte de Chile (2014 con una magnitud Mw de 8.2), y los otros 2 sismos en la zona central de Chile, siendo el más representativo el sismo del 2010 que tuvo una magnitud de 8.8 Mw.

3. Discusión

El análisis de la distribución espacial de las áreas de ruptura, ha permitido observar que los grandes sismos son repetitivos en el tiempo, y que las áreas que en algún momento liberaron energía, nuevamente pasan por un periodo de acumulación para luego dar origen a otro sismo en el futuro. Es de suponer, que el tamaño de estos sismos dependerá del periodo de acumulación de dicha energía, y de la extensión del área de ruptura o de la laguna sísmica.

En la Figura 4 se representa la distribución espacial de las áreas de ruptura en función de su latitud y periodo de ocurrencia. Esta Figura, permite observar claramente el diferente potencial sísmico que se presenta en todo el borde Oeste de Sudamérica, siendo posible dividirla en tres zonas.

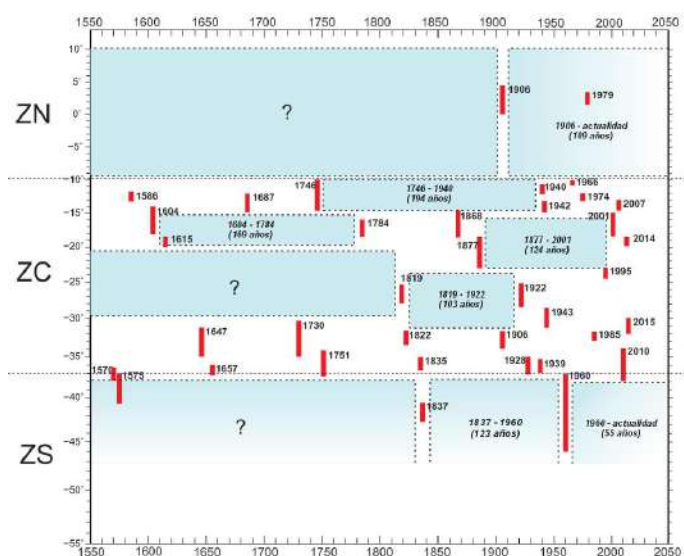


Figura 4. Grandes sismos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica en función de su ubicación en latitud, fecha de ocurrencia y longitud de ruptura.

Para la zona Norte (ZN), se tiene información sobre la ocurrencia de 2 sismos importantes ocurridos en Ecuador y Colombia; por lo tanto, no es posible determinar el tiempo de acumulación de energía antes de estos eventos, debido a que no se cuenta con información suficiente. En la zona Central (ZC), se observa la ocurrencia continua de sismos con periodos de retorno del orden de 150 años aproximadamente. Para la zona Sur (ZS), se observa la posible presencia de un silencio sísmico, que termina con la ocurrencia del sismo de 1837 y luego; después de 123 años, ocurre uno de los mayores terremotos de la historia sísmica de Sudamérica, afectando a la localidad de Valdivia al Sur de Chile en 1960. Este sismo alcanzó una magnitud de 9.5 Mw con una longitud de ruptura de unos 1000 km. Este sismo inició un nuevo periodo de silencio sísmico en esta región.

4. Conclusiones

Debido a la falta de conocimientos en detalle sobre los diferentes procesos que anteceden a la ocurrencia de un sismo, no es posible definir con exactitud donde y cuando se originaría un futuro sismo. Sin embargo, con el análisis de la distribución espacial de las áreas de ruptura de grandes sismos ocurridos en el Borde Occidental de Sudamérica, se ha podido identificar la presencia de hasta 8 lagunas sísmicas que más adelante darían origen a igual número de sismos (Figura 5). Estas lagunas sísmicas se ubican entre las áreas de ruptura de los siguientes sismos: hacia el extremo Norte del terremoto de 1979 en Colombia (440 km.de longitud); entre los sismos de 1979 y 2007 abarcando todo la costa del Ecuador y zona Norte y Centro del Perú (1332 km.de longitud); entre los sismos de 2007 y 2001 en el extremo Sur del Perú (200 km.de longitud); entre los sismos del 2001 y 2014 al Sur del Perú y Norte de Chile (100 km.de longitud); entre los sismos de 2014 y 1995 al Norte de Chile (350 km.de longitud); entre los sismos de 1995 y 2015 al Norte y parte Central de Chile (570 km.de longitud); entre los sismos del 2015 y 2010 al Centro de Chile (200 km.de longitud); y finalmente, al Sur del terremoto de Chile del 2010 (más de 1000 km.de longitud). Esta última involucra a la gran laguna sísmica del terremoto de 1960 (9.5 Mw).

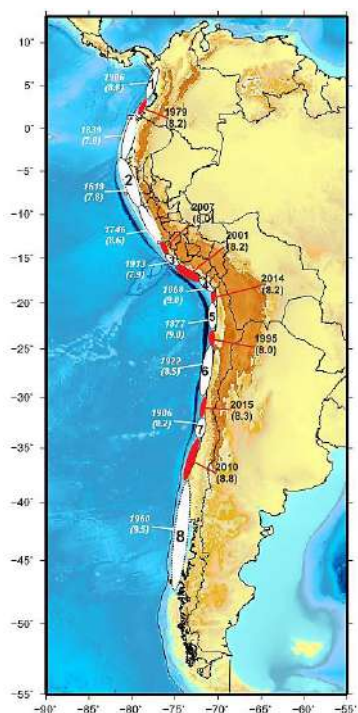


Figura 5. Mapa de ubicación de las 8 posibles Lagunas Sísmicas y los grandes eventos sísmicos; que en el pasado, habrían ocurrido en estas áreas.

5. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis. También al Dr. Hernando Tavera, por su asesoramiento y por estar a cargo de mi capacitación en la realización de mi tesis. Asimismo, al personal de la Sub-dirección de Ciencias de la Tierra Sólida, por su amabilidad y colaboración.

6. Bibliografía

Barrientos s. (2014). (Centro sismológico Nacional-Universidad de Chile), Informe Técnico-terremoto de Iquique, Mw=8.2, 1° de abril del 2014.

Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso y L., Vaca S. (2012). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. Bulletin of the Seismological Society of America, 103, 2a, 773-786, doi: 10.1785/0120120270

Bernal I. (2002). Aproximación a un modelo detallado de la sismicidad en el Perú: características y evaluación de la energía sísmica liberada. Tesis de ingeniería unsa, 170 pág.

Carpio J, Zamudio Y. y Salas H. (2002) Características generales del tsunami asociado al terremoto de Arequipa del 23 de junio del 2001 (Mw = 8.2) Centro Nacional de datos Geofísicos. terremoto de la región Sur del Perú del 23 de junio del 2001, cndg (202), p 121-128.

Comte d. & M. Pardo (1991). Reappraisal of Great Historical Earthquakes in the Northern Chile and Southern Perú seismic gaps. Natural hazards, 4, 23-44.

Demets C., Gordon R. G., Argus D. F. & Stein S. (1990). Current plate motions. Geophysical Journal International 101, 425-478.

Dorbath L. A. Cisternas & c. Dorbath (1990). Assessment if the size of large and great historical earthquake in Peru. Bull. Seism.

Soc. Am., 80,551-576.

Dorbath et al, (1990). Seismicity and tectonic deformation in the Eastern Cordillera end the sub-Andean zone of central Perú. – Journal of South American Earth Sciences, Vol.4, No. ½, pp, 13-24, 1991.

Espinosa, A. (2001). La sismicidad histórica en Colombia, Revista Geográfica Venezolana, Vol. 44(2) 2003, 271-283

INDECI (2006) Instituto Nacional de Defensa Civil - Compendio estadístico de prevención y atención de desastres - Sismos ocurridos en el Perú a través del tiempo.

Kausel E. (1986). "Los terremotos de Agosto de 1868 y Mayo de 1877 que afectaron el sur del Perú y Norte de Chile" bol. acad. chil. cienc., 3, 8-12.

Kagan Y. & D. Jackson (1991). Seismic gap hypothesis: Ten years after. j. geophys. res., 96, 21419 - 21431.

Kagan Y. & D. Jackson (1995) New Seismic gap hypothesis: Five years after. j. geophys. res., 100, 3943 – 3959.

Kelleher J. (1972). Rupture zones of large South American Earthquakes and some predictions. j. geophys. res., 77, 2087 – 2103.

Mccann W., S. Nishenko, I. Sykes & J. Krause (1979). Seismic gaps and plate tectonics: seismic potential for major boundaries. Page oph, 117, 1082 – 1147.

Nishenko S. (1985). Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and Southern peruvian margin of South América: a quantitative reappraisal. j. geophys. res., 90, 3589 – 3615.

Nishenko S. & I. Sykes (1993). Comment on "Seismic gap hypothesis: Ten years after" by y. kagan y d. jackson j. geophys. res., 98, 9909 – 9916.

ONEMI (2009). Informe Consolidado n°1 – Sismo destructivo del 03 de marzo 1985 – Unidad de riesgos de origen natural – División de protección civil, Santiago, Chile.

Quispe R., Tavera H. & Bernal I. (2003) geometría de la placa de nazca y el borde occidental de sudamérica a partir de las tendencias medias de sismicidad. boletín de la sociedad geológica del Perú v. 95 (2003) p. 93-110.

Sanclemente, E., Iovalalen, M., Navarrete, E. (2011) Escuela Superior Politécnica del litoral (ESPOL) Ecuador, Facultad de Ingeniería y Ciencias de la tierra.: "Estimación de los parámetros de ruptura del terremoto de Esmeraldas del 12 de diciembre de 1979, a partir de los datos hidrográficos y simulación numérica de propagación de tsunamis".

Silgado E. (1978). Terremotos destructivos en América del Sur, 1513-1974, proyecto SISRA 10, 1-328, CERESIS, Lima.

Tapia P., Roldán W., Villacis C.,(2002) Vulnerabilidad Sísmica de las ciudades del Norte de Chile: Arica, Antofagasta y Copiapo-Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte - Antofagasta, Chile, Geohazard International Palo Alto, California, EEUU.

Tavera H. & E. Bufo (1998). Sismicidad y Sismotectónica de Perú. en: a. Udias y E. Bufo (eds). Sismicidad y Sismotectónica de Centro y Sudamérica. Física de la tierra ucm, n° 10, 187-219.

Tavera H. (2002). Terremoto de la región Sur del Perú del 23 de junio del 2001 cndg - p 11-18. "Historia de un terremoto anunciado para la región Sur del Perú – Centro Nacional de datos Geofísicos.

DETERMINACIÓN DE ESCENARIO DE RIESGO SÍSMICO EN EL DISTRITO DE SAN ISIDRO

DETERMINATION OF SEISMIC RISK SCENARIO IN THE DISTRICT OF SAN ISIDRO

Jose María Jesús Campoverde Oropeza

Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo
jcampoverdeoropeza@gmail.com

Asesor: Dr. Hernando Tavera

Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
IGP

Resumen

El distrito de San Isidro es una de las áreas urbanas más importantes de la ciudad de Lima, donde concurren significativas inversiones y población, dadas las inmejorables condiciones que tiene el distrito de accesibilidad, privacidad, medio ambiente y seguridad; y a su vez, está ubicada en la proximidad de una de las principales fuentes generadoras de eventos sísmicos: la zona de subducción, definida por la interacción de la Placa de Nazca y la Placa Continental. El presente estudio pretende establecer los niveles de riesgo sísmico. Mediante la información catastral predial se pudo determinar los parámetros de la vulnerabilidad de las edificaciones y mediante el mapa de Zonificación Geotécnica- Sísmica del distrito de San Isidro, se estratificó el peligro sísmico. Aplicando la metodología AHP (Proceso de Análisis Jerárquico) se realizó la ponderación de la vulnerabilidad y el peligro sísmico; para después, utilizando la matriz de riesgo, obtener los niveles de riesgo esperado. Los resultados muestran que el distrito de San Isidro presenta tres niveles de riesgo: Alto, Medio y Bajo. El predominio de suelos tipo S1 (Zona I) permite que el distrito de San Isidro, alcance un nivel de riesgo Medio en un 85.38 % del total de lotes existentes.

Palabras clave: peligro sísmico, vulnerabilidad, escenario de riesgo.

Abstract

The district of San Isidro is one of the most important urban areas of the city of Lima, where significant investments concur and population, given the excellent conditions that has the district accessibility, privacy, environment and safety; and in turn, it is located in the vicinity of one of the main sources of seismic events: the subduction zone, defined by the interaction of the Nazca plate and the continental plate. This study aims to establish levels of seismic risk. Cadastral information by property taxes could determine the parameters of the vulnerability of buildings and by the zoning map Geotécnica- Seismic district of San Isidro, the seismic hazard was stratified. Applying the methodology AHP (Analysis Hierarchy Process) the weighting of vulnerability and seismic hazard was made; then, using the risk matrix, get the expected risk levels. The results show that the district of San Isidro has three levels of risk: High, Medium and Low. The predominance of soil type S1 (Zone I) permits the district of San Isidro, reaches a medium level of risk in 85.38% of all existing lots.

Keywords: seismic hazard, vulnerability, risk scenario.

1. Introducción

El distrito de San Isidro está ubicado al Suroeste del centro de la ciudad de Lima y a su vez localizado en el borde del Pacífico oriental, también llamado Cinturón de Fuego del Pacífico, donde se libera más del 80 % de energía sísmica a nivel mundial, dentro del área de interacción de la Placa Continental Sudamericana y la Placa de Nazca.

Teniendo en cuenta que el concepto de laguna sísmica, considera aquellas zonas que en el pasado han experimentado la ocurrencia de grandes sismos y que a la fecha, estos aún no se repiten, situación temporal que incrementa su probabilidad de ocurrencia.

Según estudios de Silgado (1978), la ciudad de Lima se ha visto afectada por sismos de gran magnitud los que han producido daños importantes. De acuerdo a la distribución espacial de las áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde occidental del Perú, para la región centro se ha identificado la presencia de una laguna sísmica que viene acumulando energía desde el año 1746 y que, ciertamente los sismos ocurridos en los años 1940, 1966, 1970 y 1974 presentaron magnitudes iguales o menores a los 8,0 Mw (terremoto de Pisco, 2007); ellos, no habrían liberado el total de la energía aún acumulada en dicha región (Tavera, 2014).

Frente a dicho peligro sísmico, surge la necesidad de conocer el grado de vulnerabilidad y generar un escenario de riesgo sísmico para el distrito de San Isidro, debido a sus condiciones de albergar grandes edificaciones, actividades empresariales, comerciales y población concurrente de otros distritos de la ciudad de Lima.

El conocimiento de los parámetros de vulnerabilidad de la edificación (material predominante, estado de conservación, antigüedad, configuración de la elevación, entre otros), su interacción con la representación del peligro sísmico y mediante la aplicación de una metodología de análisis multicriterio (AHP- Proceso de Análisis Jerárquico), van a permitir obtener el escenario de riesgo sísmico.

Cabe mencionar, que dicho resultado (escenario de riesgo sísmico) podrá ser una herramienta fundamental para la toma de decisiones en la gestión de riesgo de desastres de la autoridad competente del distrito de San Isidro, así como, ser replicado en otros ámbitos geográficos.

2. Escenario de riesgo sísmico

2.1. Peligro sísmico

Según la última modificación de la norma técnica peruana de diseño sísmo resistente (E.030, 2016), el

peligro sísmico en el Perú se ha zonificado en cuatro zonas, basándose en la distribución espacial de la sismicidad observada, características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de estos con la distancia epicentral, así como en la información neo tectónica. El distrito de San Isidro se encuentra ubicado en la zona 4 (E.030, Norma Técnica de Diseño Sismo resistente, 576295, Lima, Perú, 2016).

En la actualidad, es ampliamente conocido que las condiciones locales de sitio es uno de los principales factores responsables de los daños que se producen en cualquier tipo de edificación durante la ocurrencia de sismos severos. Este factor es fuertemente dependiente de las condiciones geológicas, geomorfológicas, geodinámicas y geofísicas de las zonas en estudio y que en conjunto controlan la amplificación de las ondas sísmicas causantes de los daños a observarse en superficie después de ocurrido un sismo.

Las condiciones locales de sitio son evaluadas en los estudios de zonificación sísmica- geotécnica y el resultado se constituye como una de las herramientas más importantes orientadas a minimizar los daños producidos por sismos. La finalidad es evaluar el comportamiento dinámico de los suelos (CDS), teniendo en cuenta que la intensidad de las sacudidas sísmicas varía considerablemente a distancias cortas y áreas pequeñas.

Basados en los análisis de los registros de excavaciones realizados y de la información recopilada, el CISMID (Centro Peruano- Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres) ha elaborado el Mapa de Zonificación Geotécnica- Sísmica del distrito de San Isidro, donde a determinado un predominio de la Zona I en un 90% y un 10% de Zona III (S3) y Zona V en la zona de acantilado y playa.

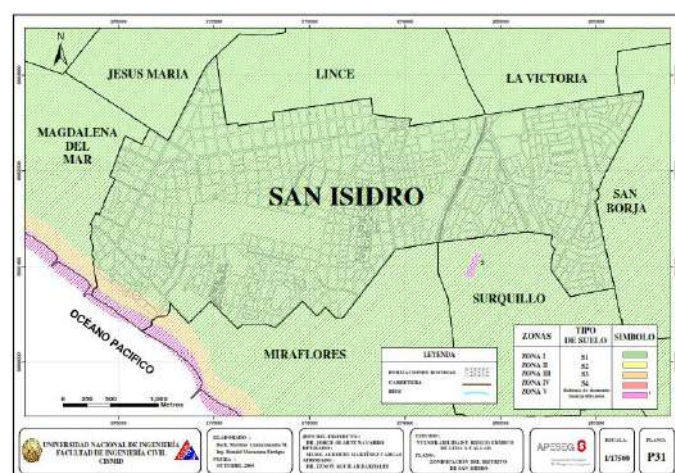


Figura 1. Mapa de Zonificación Geotécnica -Sísmica del distrito de San Isidro (CISMID- 2005)

2.2. Vulnerabilidad del distrito de san isidro

La vulnerabilidad se basa en tres factores: exposición, fragilidad y resiliencia (Cardona, 2003). Respecto a la resiliencia se optó por discriminarla, según el último censo, señala que el 53.19% cuenta con grado de instrucción superior universitaria completa (INEI, 2007).

El catastro predial de la municipalidad de San Isidro es una fuente importante de información para poder analizar y determinar la vulnerabilidad; pues, cuenta con parámetros fundamentales como: material predominante, estado de conservación, antigüedad, configuración de la elevación, entre otros.

2.2.1. Exposición

La exposición, está referida a las decisiones y prácticas que ubican al ser humano y sus medios de vida en la zona de impacto de un peligro. La exposición se genera por una relación no apropiada con el ambiente, que se puede deber a procesos no planificados de crecimiento demográfico, a un proceso migratorio desordenado, al proceso de urbanización sin un adecuado manejo del territorio y/o políticas de desarrollo económico no sostenibles (Manual para la evaluación de riesgos originados por Fenómenos Naturales. 02 versión. Lima, Perú. 2015).

2.2.2. Fragilidad

Referida generalmente a las condiciones físicas de una sociedad y es de origen interno, por ejemplo: los procedimientos constructivos, incumplimiento de la normativa técnica de edificaciones, entre otros.

2.3. Metodología

Para obtener los resultados esperados se optó por requerir de una metodología simple, adaptable, que permita el consenso entre parámetros y que no requiera de especialización para su aplicación. Así mismo el uso de los sistemas de información geográfica era fundamental para obtener los resultados idóneos.

2.3.3. Proceso de análisis jerárquico (AHP)

El Proceso de Análisis Jerárquico, desarrollado por Thomas L. Saaty (The Analytic Hierarchy Process, 1980) está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, después especifique su preferencia con respecto a cada una

de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión.

El punto central del AHP es el proceso de asignar ponderación a los parámetros y descriptores relacionados con una decisión y la calificación final de las diferentes alternativas respecto de los criterios seleccionados.

El AHP permite realizar mediciones de factores tanto subjetivos como objetivos a partir de estimaciones numéricas, verbales o gráficas. El hecho de tener definida una escala general, aplicable a cualquier situación, permite la universalidad del método y lo hace sencillo de aplicar para quien tome la decisión.

Tabla 1 Escala de Saaty

Juicio de Importancia	Puntaje
Extremadamente más importante	9
	8
Muy fuertemente más importante	7
	6
Fuertemente más importante	5
	4
Moderadamente más importante	3
	2
Igualmente importante	1

Fuente: Saaty (1980)

Los valores 2, 4, 6 y 8 se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores. Estos son valores intermedios de preferencia.

Con la información catastral predial del distrito de San Isidro, se procedió a realizar el acondicionamiento y la complementación gráfica y alfanumérica para que posteriormente sea sometido al Proceso de Análisis Jerárquico.

Para dicho propósito se tomaron los siguientes parámetros y sus descriptores correspondientes, de acuerdo a la siguiente figura:

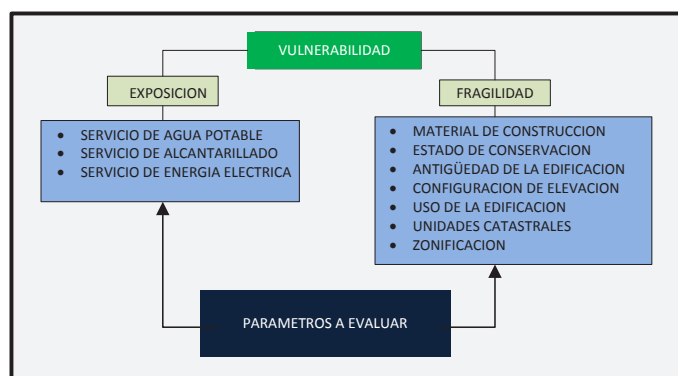


Figura 2. Parámetros obtenidos del catastro predial del distrito de San Isidro para analizar la vulnerabilidad.

La matriz que se forma es una matriz cuadrada, es decir el mismo número de filas y columnas.

La notación matemática sería: $A=A_{ij}$

Para el cálculo de los pesos ponderados: se construye la matriz de comparaciones pareadas, el que mostraría la comparación entre criterios, esta matriz va a permitir determinar la importancia de un criterio respecto del otro (utilizando la Escala de Saaty), lo que servirá posteriormente para la ponderación de criterios.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Sumamos verticalmente los elementos de cada columna. Así se obtiene los valores

$$v1, v2, \dots, vn = \sum_{i=1}^n a_i$$

A continuación se construye la matriz de comparaciones normalizada: el cual se obtiene de dividir cada elemento de matriz entre la suma obtenida, para conseguir:

$$A_{Normalizada} = \begin{pmatrix} 1/v1 & a_{12}/v2 & \dots & a_{1n}/vn \\ a_{21}/v1 & 1/v2 & \dots & a_{2n}/vn \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}/v1 & a_{n2}/v2 & \dots & 1/vn \end{pmatrix}$$

Después, se obtiene el vector prioridad, el cual nos va a mostrar los pesos ponderados de cada criterio a partir de la matriz normalizada:

Para ello se calcula el vector columna:

$$p = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{1j} \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{2j} \\ \dots \\ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{nj} \end{pmatrix}$$

Y se obtiene el vector de prioridades de los criterios:

$$p = \begin{pmatrix} p_{c11} \\ p_{c12} \\ \dots \\ p_{c1n} \end{pmatrix}$$

Finalmente, se verifica la posible existencia de consistencia entre los juicios expresados, para ello se realiza el cálculo de la relación de consistencia (RC); donde dicha relación nos permitirá validar el procedimiento.

La aplicación del Proceso de Análisis Jerárquico para determinar la vulnerabilidad del distrito de San Isidro permitió obtener las correspondientes ponderaciones a cada parámetro y descriptor de la vulnerabilidad.

2.3.4. Sistemas de información geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica (SIG) es un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados (G.Korte, 2001).

Esta herramienta fue indispensable para la integración de información recopilada y su procesamiento para obtener y representar cartográficamente la vulnerabilidad y la estratificación del riesgo.

Utilizando para ello, un software libre para el procesamiento de los datos gráficos y alfanuméricos.

3. Resultados

Luego del procesamiento de la información catastral se obtuvo el mapa de vulnerabilidad y posteriormente, con el mapa de Zonificación Geotécnica Sísmica, se obtuvo el mapa de Riesgo. A continuación se presentan dichos resultados:

3.1. Vulnerabilidad

Después de aplicar la metodología AHP, se pudo determinar la ponderación a los parámetros de las edificaciones donde finalmente se obtuvo el mapa de vulnerabilidad del distrito de San Isidro, dando como resultado cuatro niveles de vulnerabilidad: Muy Alta, Alta, Media y Baja.

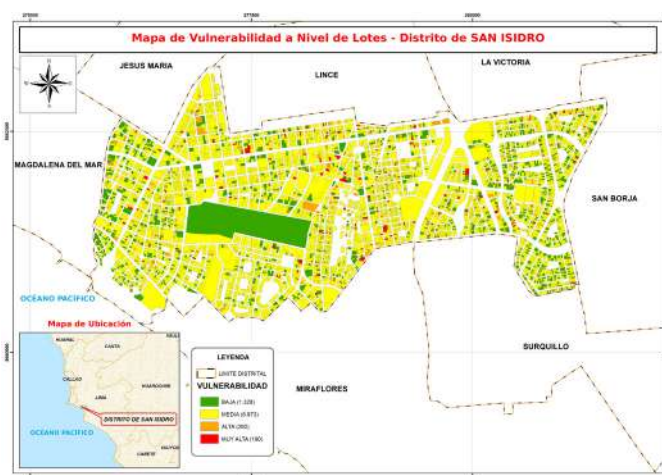


Figura 3. Mapa de Vulnerabilidad del distrito de San isidro, obtenido mediante el uso de software libre (Q gis 2.0.1)

3.2. Riesgo

Para obtener la estratificación del riesgo del distrito de San Isidro, se optó por aplicar la matriz de doble entrada: matriz del grado de peligro y matriz del grado de vulnerabilidad; previamente se tuvo que ponderar el peligro representado en el mapa de Zonificación Geotécnica- Sísmica y la vulnerabilidad.

Al respecto, el peligro y la vulnerabilidad representados en un plano cartesiano el “eje X” sería el peligro y la vulnerabilidad sería el “eje Y”.

PMA	0.503	0.034	0.067	0.131	0.253
PA	0.260	0.018	0.035	0.068	0.131
PM	0.134	0.009	0.018	0.035	0.067
PB	0.068	0.005	0.009	0.018	0.034
		0.068	0.134	0.260	0.503
		VB	VM	VA	VMA

Figura 4. Método Simplificado para la determinación del Riesgo (Manual para la determinación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2da Versión, 2015)

Finalmente, se pudo obtener el mapa de Riesgo donde se determinó para el distrito una estratificación de: Alto, Medio y Bajo. Dichos resultados fueron representados cartográficamente de acuerdo a la siguiente figura:

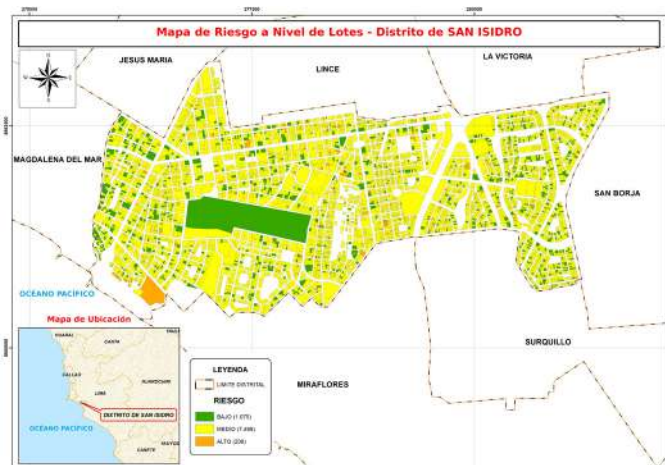


Figura 5. Mapa de Riesgo del distrito de San isidro, obtenido mediante el uso de software libre (Q gis 2.0.1)

4. Discusión

Los resultados obtenidos respecto a los niveles de Riesgo, fueron los esperados; pues, el Mapa de Zonificación Geotécnica- Sísmica evidenciaba un tipo de suelo S1 (Zona I) en un 90 % de la extensión superficial del distrito y al estratificarlo se obtuvo nivel de peligro: Bajo.

Respecto a la vulnerabilidad, al no evaluar la resiliencia, debidamente justificada, los resultados obtenidos no se ajustaron a lo que indica en el Manual de Determinación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales, 2da Versión, 2015 del CENEPRED.

5. Conclusiones

Se logró estratificar el riesgo sísmico de los 8 783 lotes del distrito de San Isidro y obtener los siguientes niveles: Alto, Medio y Bajo.

Son 209 lotes que presentan un riesgo Alto; los cuales representan un 2.38 % del total de lotes del distrito de San Isidro.

Son 7 499 lotes que presentan un riesgo Medio; los cuales representan un 85.38 % del total de lotes del distrito de San Isidro.

Son 1 075 lotes que presentan un riesgo Bajo; los cuales representan un 12.24 % del total de lotes del distrito de San Isidro.

El nivel de Riesgo Medio que predomina, se debe a que el tipo de suelo S1 (Zona I) se encuentra en un 90 % del total de la superficie del distrito de San Isidro.

6. Recomendaciones

Se recomienda utilizar el presente estudio para la toma de decisiones en la Gestión de Riesgo de Desastres (GRD), como etapa inicial de Estimación de Riesgo.

Aplicar la metodología en distritos que mantengan similitud en los parámetros evaluados; así como, el uso de software libre de sistemas de información geográfica para la obtención de los resultados, pues no demandan de mucha inversión económica.

7. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por facilitarme el desarrollo de mi tema de tesis.

Al Dr. Hernando Tavera por la oportunidad, comprensión y apoyo incondicional en mi desarrollo académico.

8. Bibliografía

CENEPRED. (2015). *“Manual para la evaluación de riesgos originados por Fenómenos Naturales”*. 2° Edición. Lima- Perú. 256 pp.

CISMID. (2005). *Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en Lima y Callao- Distrito de San Isidro*. 12 pp.

E.30, *Norma Técnica de Diseño Sismo resistente*, 576293-576322, Lima, Perú (2016).

Silgado, E. (1978). *Historia de Los Sismos más Notables ocurridos en el Perú (1513- 1974)*, Instituto de Geología y Minería. Boletín N° 3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica. Lima – Perú.

Tavera, H. (2014). *Escenario de Sismo y Tsunami en el Borde Occidental de la Región Central del Perú*. Lima-Perú. 30 pp.

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y SU APLICACIÓN PARA LA IDENTIFICACION DE ESCENARIOS DE RIESGO EN LA CIUDAD DE BARRANCA – LIMA

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM AND ITS APLICATTION FOR IDENTIFYING RISK SCENARIOS IN THE CITY OF BARRANCA – LIMA

Leonidas Javier Oyola Coral

Universidad Nacional Federico Villarreal
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo
joyola@igp.gob.pe

Asesor: Dr. Hernando Tavera

Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida
IGP

Resumen

La ciudad de Barranca está ubicado al borde occidental de América del Sur, la cual es una de las regiones de mayor actividad sísmica que existe en la tierra, denominado como “Cinturón de fuego del Pacífico” y a través de los años la costa peruana ha sido afectada con la ocurrencia de grandes sismos poniendo en evidencia la vulnerabilidad de la ciudad de Barranca, lo cual produce cuantiosos daños materiales y pérdidas humanas. Por lo tanto, es necesario conocer, determinar las zonas con mayor riesgo y vulnerabilidad estructural, además la resiliencia de la población para desarrollar acciones de planificación y ordenar el territorio con el fin de mitigar los grandes efectos.

Ante la ocurrencia de un desastre existe un mayor riesgo si no hay estudios técnicos que permitan afrontar los daños físicos, sociales, económicos, ambientales, institucionales y culturales a los que la población se encuentra expuesta.

Palabras clave: vulnerabilidad estructural, escenarios de riesgo, peligros, planificar, mitigar

Abstract

The city of Barranca is located at the western edge of South America, which is one of the regions of greater seismic activity that exists on earth, known as the “Ring of Fire” and through the years the Peruvian coast has been affected by the occurrence of large earthquakes highlighting the vulnerability of the city of Barranca, resulting in material damage and human losses. Therefore, it is necessary to know, identify areas most at risk and structural vulnerability, plus the resilience of the population to develop action planning and ordering the territory in order to mitigate the great effects.

Upon the occurrence of a disaster there is an increased risk if there are no technical studies to meet the physical, social, economic, environmental, institutional and cultural damage to which the population is exposed.

Keywords: structural vulnerability, risk scenarios, hazards, planning, mitigate

1. Introducción

De acuerdo a la historia sísmica del Perú se ha mostrado que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos y que de acuerdo a sus aspectos (tales como la magnitud, intensidad, profundidad del foco, efectos de Ampliación de las ondas sísmicas y duración), muchos de ellos han producido daños importantes en ciudades y localidades distribuidas cerca de la zona costera. La ocurrencia de efectos secundarios como asentamientos, licuación de suelos, derrumbes, caídas de roca y tsunamis propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales

La ciudad de Barranca ha ido creciendo de manera desordenada, debido a que no existen estudios de desarrollo urbano que permita a las autoridades establecer normas para que la población pueda asentarse en lugares seguros de forma ordenada donde se pueda minimizar el riesgo considerable frente a los peligros naturales como terremotos, tsunamis e inundaciones. Es parte del peligro el tipo de construcciones que existen en la ciudad, muchas de ellas realizadas de manera informal, sin contar con la asesoría de profesionales se suma a esta situación la falta de cultura de prevención por parte de la población, lo cual los hace más vulnerable frente a la ocurrencia de algunos de estos peligros. Además de afrontar daños físicos a las construcciones, podemos mencionar también pérdidas económicas, problemas ambientales, conflictos sociales.

Por eso se debe efectuar estudios técnicos que ayuden a la planificación y mitigación de los factores que afectan la exposición de la población a estos peligros.

2. Objetivos

Identificar los peligros que pueden producirse en la ciudad de Barranca

Analizar y proyectar los posibles daños y efectos que pueden ocurrir a las edificaciones y a la población en la ciudad de Barranca, considerando la morfología del relieve y la composición del suelo.

Identificar las áreas de mayor vulnerabilidad estructural de la ciudad de Barranca, frente a un evento sísmico de gran magnitud.

3. Ubicación del área de estudio

La ciudad de Barranca se ubica en la Cuenca de Pativilca, localizada en la costa central del Perú, perteneciendo a la vertiente del Pacífico y drena un área total de 4,837km².

El área de estudio está comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas:

- 10°43' Lat. Sur y 77°47' Long. Oeste
- 10°47' Lat. Sur y 77°44' Long. Oeste

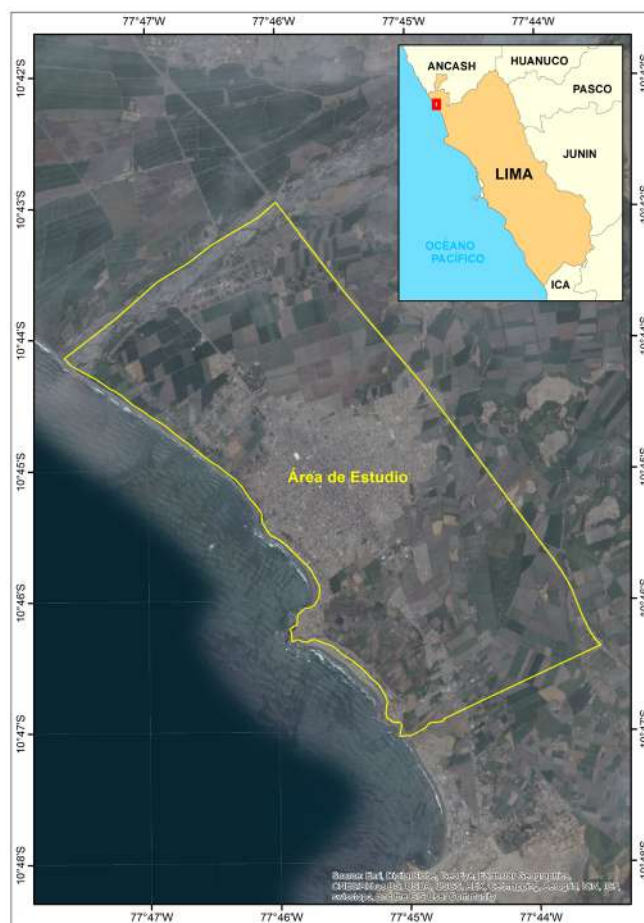


Figura 1. Ubicación de área de estudio.

4. Definiciones básicas

Peligro

Es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural o inducido por la actividad del hombre, potencialmente dañino, de una magnitud dada, en una zona o localidad conocida, que puede afectar un área poblada, infraestructura física y/o el medio ambiente.

Vulnerabilidad

Es el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada. Es la facilidad como un elemento (infraestructura, vivienda, actividades productivas, grado de organización, sistemas de alerta y desarrollo político institucional, entre otros), pueda sufrir daños humanos y materiales.

La vulnerabilidad, es entonces una condición previa que se manifiesta durante el desastre, cuando no se ha invertido lo suficiente en obras o acciones de prevención y mitigación y se ha aceptado un nivel de riesgo demasiado alto.

Riesgo

Se entiende como el resultado de la interacción del peligro sobre la vulnerabilidad. Éste se puede expresar tanto en forma cualitativa (grados o niveles la calificación), como también en forma cuantitativa, estimando los daños o pérdidas esperadas para un determinado evento específico o escenario de riesgo (por ejemplo: un terremoto de magnitud Richter grado 8 o superior, a una hora determinada).

Actualmente se consideran como un estándar para los estudios de riesgo 4 niveles de riesgo.

Cuadro 1. Niveles de Riesgo

Riesgo Muy Alto	Hay un riesgo muy elevado, los edificios colapsan; es decir se considera un porcentaje de peligro de caída estructural que hace inhabitable el inmueble y muerte superior al 75%.
Riesgo Alto	Hay un riesgo elevado y hay edificios que, en un sismo, puedan tener daños graves que comprometan su estabilidad, con un porcentaje de riesgo de fallo estructural y muerte superior al 50%.
Riesgo Medio	Hay edificios en los cuales se pueden presentar daños graves, pero que no comprometen la estructura haciéndola caer, con un porcentaje de riesgo de fallo estructural y muerte superior al 25%.
Riesgo Bajo	Luego de un sismo, los edificios presentan pocos daños a las estructuras y no se verifican en la edificación fallas o caídas, con una consideración del riesgo de fallo estructural y muerte superior al 5%.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad}$$

Zonificación Sísmica - Geotécnica

Se apoyan en análisis referidos a los factores de la geología local de la zona de estudio, la calidad geotécnica de los suelos y algunos parámetros de prospección geofísica, para determinar los parámetros geotécnicos, geodinámicos, de resistencia portante y de isoperiodos sísmicos, que son los que van a determinar los niveles de la susceptibilidad del terreno.

5. Zonificación Sísmica - Geotécnica

El Mapa de Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Barranca considera el análisis e interpretación de la información geológica, geomorfológica, geodinámica, geotécnica, sísmica y geofísica. Para la ciudad de Barranca, las características dinámicas del suelo han permitido identificar, de acuerdo a la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E030), la existencia de tres

tipos de suelos:

Tipo S1, S2 y S4, este último asociado a condiciones excepcionales

Para la ciudad de Barranca se propone la siguiente zonificación Sísmica Geotécnica (Figura 2):

ZONA I: Conformada por estratos de grava que se encuentran a nivel superficial o cubiertos por un estrato de material fino de poco espesor. Este suelo tiene un comportamiento rígido, con periodos de vibración natural que varían entre 0.1 y 0.3 segundos.

ZONA II: Se incluye las áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 8 y 20 metros subyaciendo a estos estratos se tiene grava eluvial. Los periodos predominantes del terreno varían entre 0.3 y 0.5 segundos, predominantes del terreno varían entre 0.3 y 0.5 segundos.

ZONA III: No identificada en la ciudad de Barranca.

ZONA IV: Conformada por depósitos de arenas eólicas de gran espesor, depósitos

fluviales, depósitos marinos y suelos pantanosos. Los periodos predominantes en estos suelos son mayores que 0.7 segundo.

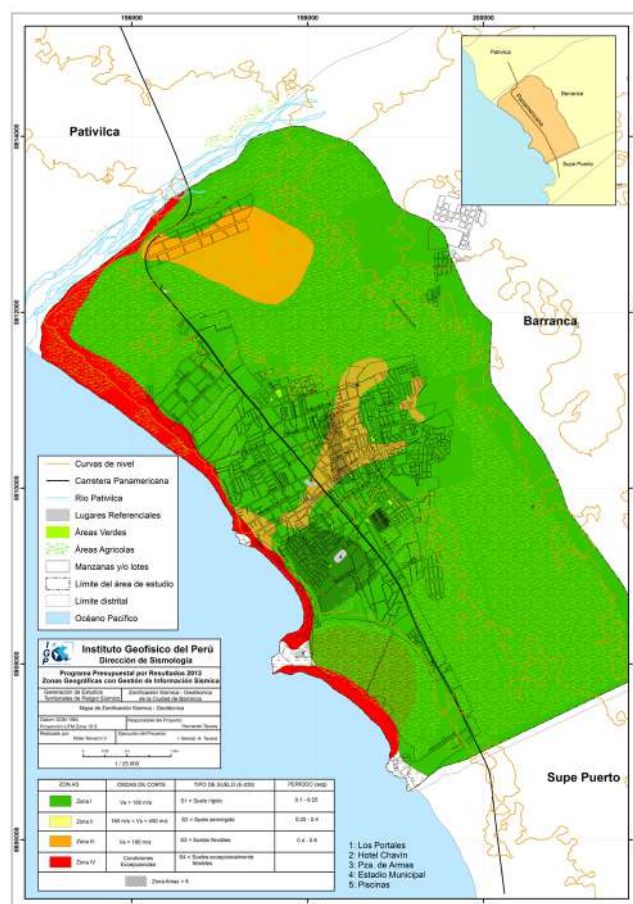


Figura 2. Mapa Zonificación Sísmica - Geotécnica.

6. Metodología

La metodología a seguir en el desarrollo del presente estudio se basa en el levantamiento de campo, procesamiento y análisis de datos reales. Posteriormente a esto se generará mediante la lógica difusa generar un diseño de simulación mediante muestreo de datos y poder obtener para la propuesta de un escenario sísmico en la ciudad de Barranca.

6.1. Trabajo de campo

Para obtener información física y caracterizar aspectos socioeconómicos se viene realizando el trabajo de campo, mediante una ficha donde se evalúa información de tipo catastral. Los datos recopilados caracterizaban aspectos físicos de las viviendas como: tipo de uso, estado, número de pisos, antigüedad, tipo de vivienda, tipo de techo, tipo de alero, pendiente y tipo de suelo. A manera de encuesta se realizaron unas preguntas para saber si la población se encuentra preparada en caso de ocurrencia de un sismo, también el número de habitantes por vivienda.

FICHA TÉCNICA DE CAMPO			
TECNICO:			
MANZANA:	LOTE:	FECHA:	
INFORMACION DEL PREDIO			
MATERIA PREDOMINANTE:	ESTADO ACTUAL:	TIPO DE USO:	
Nº DE PISOS:	ANTIGÜEDAD (AÑOS):		
CONDICIONES FÍSICAS DEL PREDIO			
TIPO DE TECHO:	PRESENTA ALERO:	SI <input type="radio"/>	NO <input type="radio"/>
PRESENTA FISURAS O RAJADURAS:	PRESENTA HUMEDAD O DESGASTE:	SI <input type="radio"/>	NO <input type="radio"/>
CONDICIONES DEL TERRENO			
PENDIENTE DE TERRENO:			
BAJA (0-5 %): <input type="radio"/> MEDIA (5-15%): <input type="radio"/> ALTA (15-30 %): <input type="radio"/> MUY ALTA (>30 %): <input type="radio"/>			
TIPO DE SUELO:			
ROCA: <input type="radio"/> ARCILLA: <input type="radio"/> ARENA Y LIMO: <input type="radio"/> SUELOS PANTANOSOS: <input type="radio"/> RELLENO SANITARIO: <input type="radio"/>			
NIVEL DE PREPARACION DEL POBLADOR ANTE UN SISMO:			
1. ¿Podrá afrontar económicamente un sismo hasta que llegue la ayuda?		SI <input type="radio"/>	NO <input type="radio"/>
2. ¿Tiene conocimientos de las acciones a realizar en caso de un sismo y/o tsunamis?		SI <input type="radio"/>	NO <input type="radio"/>
3. ¿Tiene conocimientos de que zonas son seguras en su vivienda?		SI <input type="radio"/>	NO <input type="radio"/>
4. ¿Esta dispuesto a apoyar en caso de un sismo?		SI <input type="radio"/>	NO <input type="radio"/>
5. ¿Ha participado en algún tipo de simulacro de sismo?		SI <input type="radio"/>	NO <input type="radio"/>
OBSERVACIONES:		FOTO DEL PREDIO	

Figura 3. Ficha técnica de campo

6.2. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El proceso Analítico Jerárquico (Analytical Hierarchy Process – AHP) es un método que fue desarrollada por el Dr. Thomas Saaty (1980). Se puede mencionar las siguientes características de este método

- Instrumento formal
- Permite manejar variables cualitativas y cuantitativas
- Es una herramienta útil en la toma de decisiones
- Aplicación sencilla y un fundamento matemático sólido

En la matriz de comparación de pares se evalúa la intensidad de preferencia de un parámetro frente a otro. Para la selección de los valores se usa la escala desarrollada por Saaty. La escala ordinal de comparación se mueve entre valores de 9 y 1/9.

Cuadro 2. Escala de importancia relativa

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual Importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio están moderadamente a favor de una actividad sobre la otra
5	Importancia Fuerte	La experiencia y el juicio están fuertemente a favor de una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte	Una actividad está muy fuertemente favorecida y su dominio ha sido demostrado en la práctica
9	Importancia extrema	Es máxima la importancia de una actividad sobre la otra
2,4,6,8	Valores intermedios entre los dos juicios contiguos	Cuando un término medio es necesario

Cuadro 3. Matriz de comparación de pares

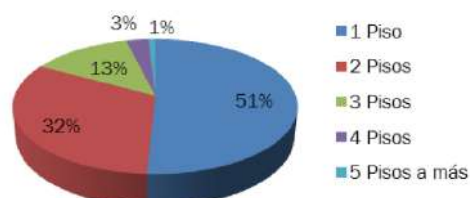
Criterios	C1	C2	C3	C4
C1	C1/C1	C1/C2	C1/C3	C1/C4
C2	C2/C1	C2/C2	C2/C3	C2/C4
C3	C3/C1	C3/C2	C3/C3	C3/C4
C4	C4/C1	C4/C2	C4/C3	C4/C4

7. Resultados preliminares

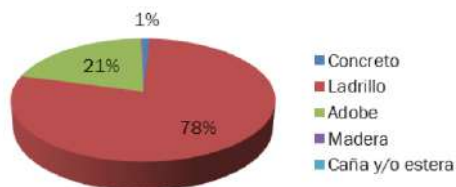
Se realizó el levantamiento de información de 3014 lotes, de los cuales 2257 presentan construcción y en los 757 restantes se encuentran, parques, lozas deportivas terrenos sin construir y viviendas en construcción.

A continuación se analiza en porcentajes, la calidad de la información recolectada en campo:

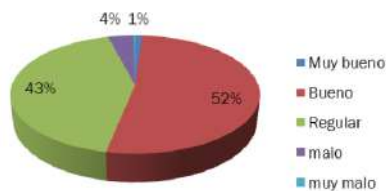
Número de Pisos



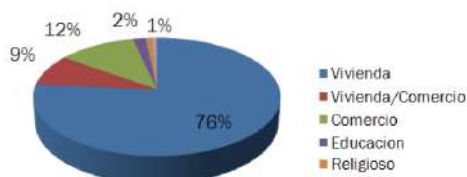
Material Predominante



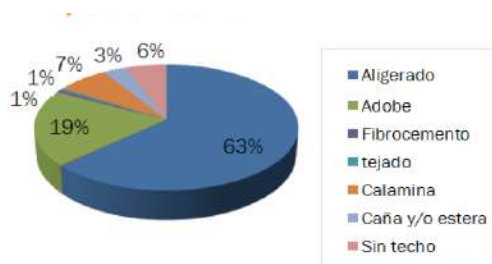
Estado de Conservación



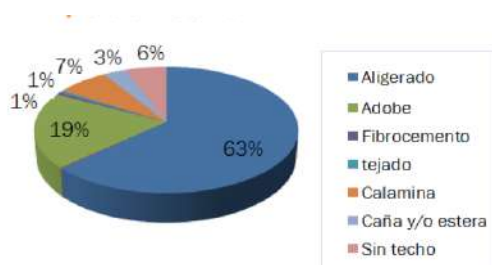
Tipo de Uso



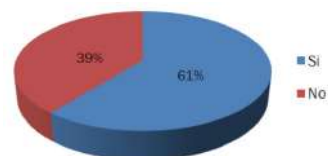
Tipo de Techo



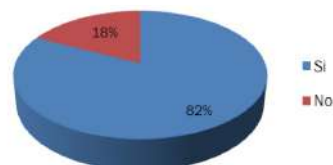
Presenta Alero y/o Volado



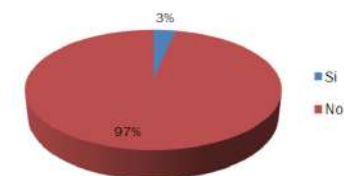
Presenta Alero y/o Volado



Con Humedad o desgaste



Con Fisura



8. Conclusiones preliminares

De acuerdo a los datos recolectados y analizados, se observa que la zona de la playa Chorrillos, la vulnerabilidad es alta debido a la calidad de las construcciones y tipos de suelos; además, por su cercanía a la línea de playa, es vulnerable ante un posible Tsunami.

Las construcciones ubicadas en el lado de derecho de la antigua Panamericana Sur, en dirección sur a norte, la mitad de predios evaluados presentan 1 piso, de ladrillo y de conservación buena, lo cual reduce su vulnerabilidad.

Las características físicas de las viviendas y el mapa de Zonificación Sísmica - Geotécnica para la ciudad de Barranca permitira determinar los niveles de vulnerabilidad que presentaría la ciudad de Barranca ante la solicitación sísmica, a la vez se podrá proponer escenarios de riesgos, evaluando los peligros identificados en la zona.

9. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis.

Al Dr. Hernando Tavera por el apoyo y facilidades, además del asesoramiento que me brinda para poder desarrollar el presente trabajo de investigación.

10. Bibliografía

Tavera, H., Bernal, I., Gomez. (2014). *Zonificación Sísmica-Geotécnica para la ciudad de Barranca (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPIIRD.*

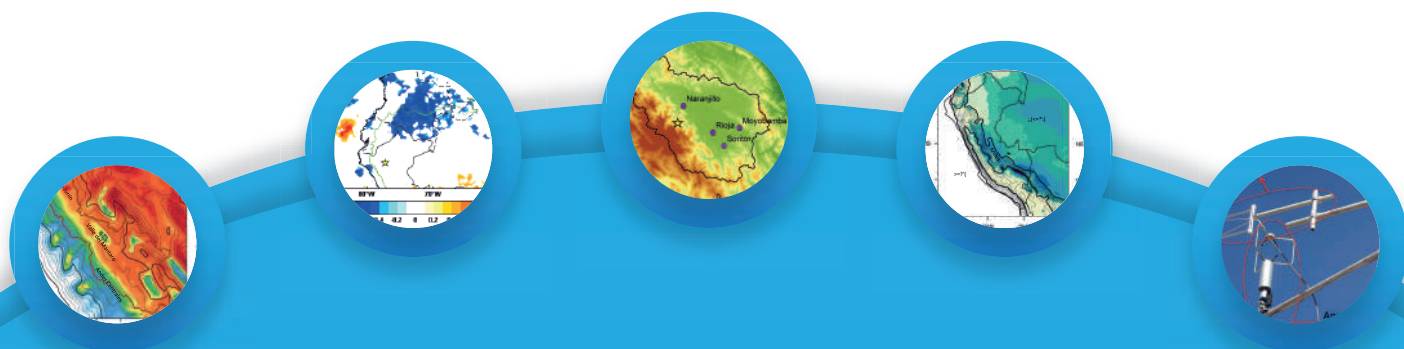
Tavera, H., Bernal, I., Gomez, J-C. (2010). *Zonificación Sísmico-Geotécnico para el Distrito del Lima (Comportamiento Dinámico del Suelo). Informe Técnico COOPIIRD.*

Álvarez, A. Hidalgo, A. y Izquierdo, M. (2005). "Empleo del AHP (proceso analítico jerárquico) incorporado en SIG para definir el emplazamiento óptimo de equipamientos universitarios. Aplicación a una biblioteca". Facultad de informática (U.P.M.) Madrid.

Asenjo, S. Irrigaray, C. y Chacón, J. (2006). "Análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas mediante sistemas de información geográfica.

Manual básico para la estimación del riesgo / Perú. Instituto Nacional de Defensa Civil. Dirección Nacional de Prevención. Lima: INDECI, 2006.

Ciencias de la **Atmósfera e Hidrósfera**



Sección **02**

CARACTERIZACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO USANDO LA TÉCNICA EDDY COVARIANCE

CHARACTERIZATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION IN THE OBSERVATORY OF HUANCAYO USING EDDY COVARIANCE TECHNIQUE

Stephany Magaly Callañaupa Gutierrez

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Facultad de Ing. Geológica, Minera, Metalúrgica y Geografía
stephanymcg@gmail.com

Asesores: Ing. Hans Segura

Yamina Silva, Ph. D.

Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e
Hidrosfera
IGP

Resumen

En este estudio se analizó la evapotranspiración estimada por el método de “eddy covariance”, que utiliza 2 variables: las fluctuaciones de alta frecuencia de vapor de agua y la velocidad del viento de alta frecuencia en 3 dimensiones. Estas variables son medidas por el Higrómetro de Krypton y el anemómetro sónico que están instalados en la torre de flujo del observatorio de Huancayo (TF). Asimismo, se usaron regresiones lineales con la finalidad de conocer que variables meteorológicas influyen más en la evapotranspiración. Por último, comparamos la evapotranspiración observada con ecuaciones empíricas Penman-Monteith, Priestley-Taylor y Hargreaves (usando datos meteorológicos de las TF) para saber qué ecuación se ajusta mejor a los datos observados.

Palabras clave: evapotranspiración, eddy covariance, ecuaciones empíricas, torre de flujo, valle del Mantaro.

Abstract

This study analyzed the estimated evapotranspiration by the method of “eddy covariance”, which uses 2 variables: High frequency fluctuations of vapor water and the wind speed of high frequency in 3 dimensions. These variables are measurement for the higrómetro of krypton and the sonic anemometer they are installed in the tower flow of observatory of huancayo (TF). Using linear regressions with the finality to known what meteorological variables most influence in the evapotranspiration. Finally, evapotranspiration observed compared with empirical equations Penman-Monteith, Priestley-Taylor and Hargreaves (using meteorological data TF) to know the best equation to fits the observed data.

Keywords: evapotranspiration, eddy covariance, empirical equations, flow tower, Mantaro valley.

1. Introducción

La evapotranspiración (ET) es fundamental para mejorar la comprensión del intercambio de agua entre la superficie terrestre y la atmósfera (ciclo hidrológico); además, su monitoreo es crucial para el diseño y gestión adecuado de programas de riego en cultivos, la conservación de los recursos hídricos y planeamiento de obras hidráulicas. A pesar de ello, en nuestro país no existen estudios a detalle que nos permitan entender los mecanismos físicos del intercambio de agua y de energía entre el suelo y la atmósfera (ET). Esto se debe principalmente a la heterogeneidad del paisaje, la inexistencia de datos medidos directamente en campo y la cantidad de factores involucrados en su estimación.

A pesar de los pocos estudios de evapotranspiración en zonas de montañas, existen algunos que dieron resultados importantes en esta área; por ejemplo, Aimee Higgins (2009) estudia cómo la variabilidad de la cobertura del suelo tiene un impacto en la evapotranspiración y estima una evapotranspiración referencial promedio de 13,2 mm/día en el valle de Llanganuco a partir del modelo "Ref". Hellström and Mark (2006) en la misma zona de estudio calculan una evapotranspiración en la época seca de 0,03 mm/día y en la época húmeda 2,63 mm/día a partir del modelo "BROOK90" usando datos meteorológicos in situ. Por otro lado, García et al. (2004) hace un estudio sobre la evapotranspiración en el Altiplano de Bolivia obteniendo una evapotranspiración referencial de 3 mm/día a partir del método FAO Penman-Monteith y lisímetros. Estos resultados indican que los valores pueden variar debido a la metodología utilizada. Sin embargo, hay métodos más precisos para medir evapotranspiración in-situ, como la técnica eddy covariance. Segura (2014) realizó un estudio del ciclo hidrológico en la cuenca Amazónica enfocándose en el análisis de la evapotranspiración usando la técnica de "eddy covariance" teniendo como resultado una evapotranspiración de 3 mm/día, lo que confirmaba resultados anteriores.

Aunque el sistema de "eddy covariance" mide la ET en un área, su radio de influencia es menor a 1km. Es por eso, que el análisis no se pudo realizar en los Andes peruanos. En junio del 2015, gracias al proyecto "Estudio de los procesos físicos que controlan los flujos superficiales de energía y agua para el modelado de heladas, lluvias intensas y evapotranspiración en la sierra central del Perú", se instaló una torre de flujo de 4 metros de altura en el Observatorio de Huancayo, en él se tiene un higrómetro de Krypton y un anemómetro sónico, gracias a ello se puede medir la evapotranspiración in-situ de los cultivos alrededor del observatorio. Es así, que el presente trabajo tiene como objetivos:

- Caracterizar el flujo de calor latente (evapotranspiración) en los meses de julio y agosto del 2015.
- Comparar la evapotranspiración obtenida por la torre de flujo (observada) con las ecuaciones empíricas de evapotranspiración (Penman-Monteith, Priestley-Taylor y Hargreaves) usando variables meteorológicas observados como datos de entrada.

2. Desarrollo

2.1. Ubicación de la torre de flujo

La torre de flujo está instalada en el Observatorio de Huancayo, (12°02'18" S, 75°19' 22" W, 3350 msnm), departamento de Junín, provincia Chupaca, distrito de Huachac a pocos kilómetros del centro poblado de Huayao (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de la torre de flujo en el Observatorio de Huancayo (Hans Segura).

2.2. Instrumentación necesaria para la aplicación de la técnica de eddy covariance

La técnica Eddy Covariance actualmente es una de las metodologías más precisas para la estimación de los flujos energéticos como el calor latente (evapotranspiración) (Anderson, 2010). Para esto, se necesitan dos instrumentos que midan variables en alta frecuencia (≥ 10 Hz). En este estudio se usaron el anemómetro sónico, que mide la velocidad del viento en sus tres direcciones (u, v, w), y el higrómetro de krypton, que cuantifica las fluctuaciones de vapor de agua (Figura2). Asimismo, en la torre de flujo se han instalado instrumentos meteorológicos que miden variables convencionales como la temperatura (termómetro), precipitación (pluviómetro), radiación de onda larga (pirgeómetro) y humedad relativa (termohigrómetro). Además, se cuenta con otra estación que mide las siguientes variables:

- Radiación solar (radiación de onda corta entrante).
- Temperatura superficial del suelo.

- Temperatura del subsuelo a 2cm, 5cm ,10cm, 30 cm y 50cm de profundidad.
- Humedad relativa.
- Presión atmosférica.

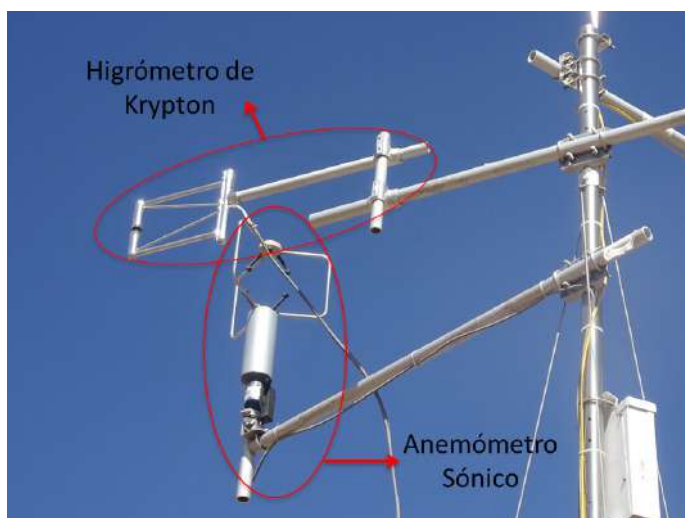


Figura 2. Torre de flujo con el equipamiento necesario: higrómetro de Kriptón y anemómetro sónico.

2.3. Métodos

2.4.1. Análisis de la evapotranspiración de torre de flujo.

De la torre de flujo se utilizó el dato de flujo de calor latente (W/m^2) a nivel horario y diario. Para convertir el flujo de calor latente (LE) W/m^2 a evapotranspiración (ET) mm/día se debe realizar la siguiente operación.

$$ET \left(\frac{mm}{dia} \right) = \frac{le * 3600 * 1000 * 24}{\lambda * \rho} \dots (1)$$

En donde: $\lambda = 2500827 - 2360 * T$

Le es el flujo de calor latente medido en la torre de flujo ($W/m^2 hr$), T es la temperatura del aire, λ es el calor latente de vaporización que depende de la temperatura (J/kg), ρ es la densidad del agua ($1025 kg/m^3$). Los valores de 3600, 1000 y 24 son valores para obtener la evapotranspiración en mm/día.

En nuestro estudio utilizamos la regresión lineal para conocer que variables meteorológicas tienen una mayor importancia en el proceso de evapotranspiración. Las variables utilizadas en la regresión lineal con el calor latente fueron la radiación solar, temperatura del aire, temperatura del suelo y humedad relativa. Para este experimento solo se calculó el coeficiente de determinación (R^2), que es una medida de cuanta varianza de la variable dependiente está siendo explicada por la variable

independiente. La escala de tiempo utilizada fue horaria, y se escogieron datos de las 7 horas hasta las 18 horas debido a que principalmente el calor latente es mayor durante las horas del día. El coeficiente de determinación es:

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} \dots (2)$$

En donde SCR es la suma de los cuadrados de la regresión lineal y se calcula con la siguiente ecuación:

$$SCR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \dots (3)$$

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma)} * \alpha \dots (6)$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración de referencia ($mm.dia^{-1}$), R_n : radiación neta ($Mjm^{-2} dia^{-1}$),

G: Flujo del calor de suelo ($Mjm^{-2} dia^{-1}$),

Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa.^{\circ}C^{-1}$),

γ : Constante psicométrica ($kPa.^{\circ}C^{-1}$),

λ : Calor latente de vaporización ($Mjkg^{-1}$),

α : Es el coeficiente de Priestley y Taylor el cual indica qué fracción del agua en el suelo puede evaporarse.

Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985)

La fórmula de Hargreaves para evaluar la evapotranspiración necesita solamente datos de temperatura y de radiación solar. La expresión general es la siguiente:

$$ET_0 = k(T + 17.78) R_s \dots (7)$$

Donde:

ET_0 : Evapotranspiración ($mm.dia^{-1}$), T: Temperatura del aire ($^{\circ}C$), R_s : Radiación solar, convertida en ($mm.dia^{-1}$), k: coeficiente de calibración.

Para la comparación de las ecuaciones empíricas y los datos observados de evapotranspiración, se calcularon el coeficiente de determinación (R^2), el error medio cuadrático (RMSE), el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y el BIAS. La escala de tiempo a la que se trabajaron los datos fue diaria.

El coeficiente de Nash (NSE) y el error medio cuadrático (RMSE) están representada de la siguiente manera:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y^{mean})^2} \right] \dots (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{n}} \dots (9)$$

Donde y_i^{obs} es el i -ésimo valor de los datos observados a ser evaluados, y_i^{sim} es el i -ésimo valor de los datos simulados a ser evaluados, y^{mean} es la media de todos los datos observados a ser evaluados y n es el total de datos a ser evaluados.

Por otro lado el BIAS mide la tendencia media de los valores simulados de ser mayor o menor que sus valores observados. El valor óptimo de BIAS es de cero o valores muy cercanos a ceros ya que indica una mayor precisión del modelo. Los valores

positivos indican sesgo de sobrestimación, mientras que los valores negativos indican una subestimación. El BIAS se representa de la siguiente manera:

3. Resultados

El gráfico de dispersión (Figura 3) a nivel horario desde las 7 horas hasta las 18 horas del mes de julio y agosto del 2015, muestran las regresiones lineales del calor latente y las variables meteorológicas.

Se observa que la radiación solar y la temperatura superficial tienen un coeficiente de determinación muy significativo con un $R^2=0,9$ y $R^2=0,7$ respectivamente. Esto indica que la radiación solar explica el 90% de la varianza del calor latente, mientras que la temperatura superficial explica el 70%.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - y_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n y_i^{obs}} \dots (10)$$

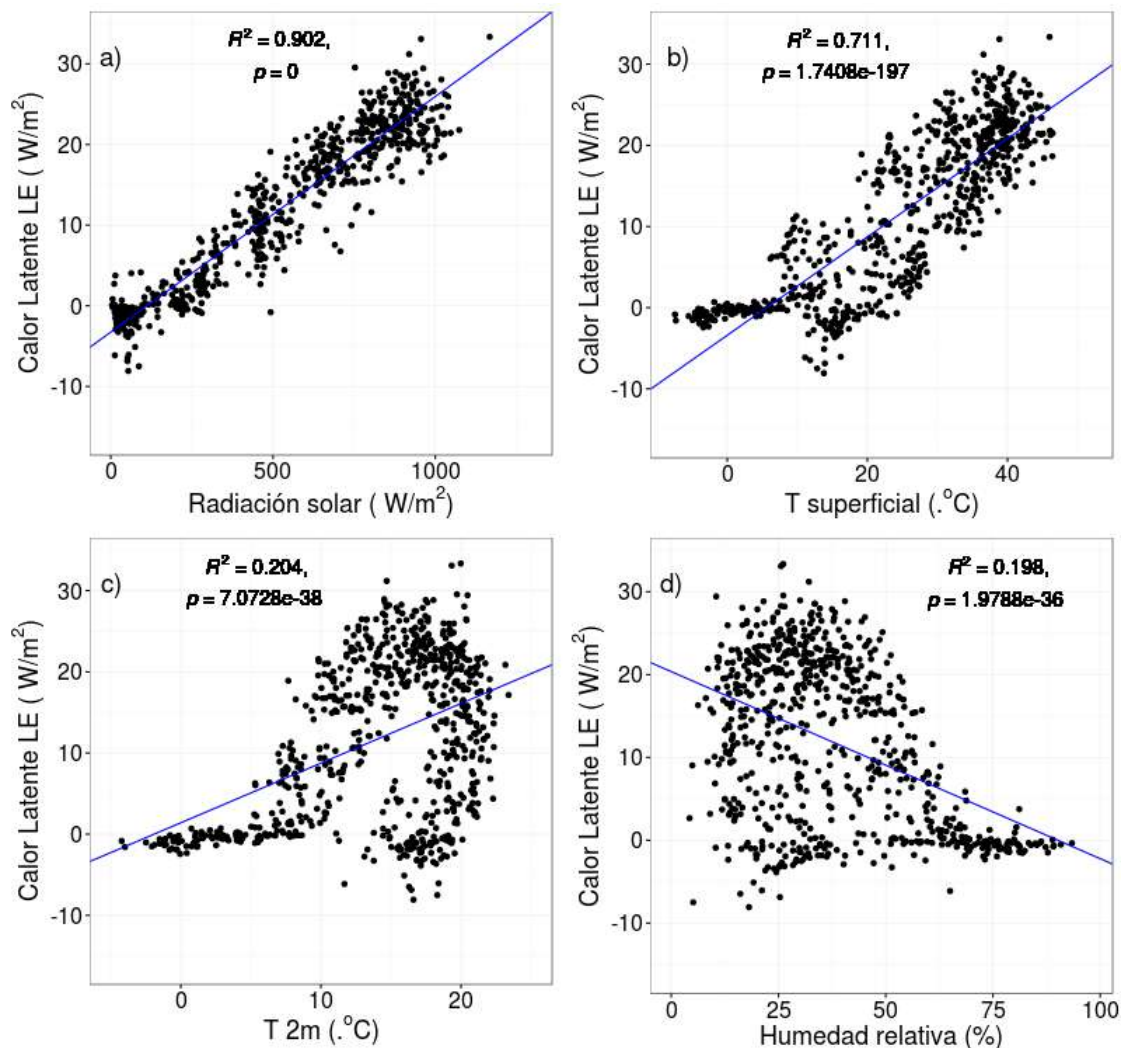


Figura 3. Regresiones lineales del calor latente versus variables meteorológicas: a) Radiación solar, b) Temperatura del suelo, c) Temperatura del aire y d) Humedad relativa. Se observa en la parte superior el coeficiente de determinación (R^2) y p-valor (p). Se muestra la línea de regresión lineal (línea azul).

Por otro lado, las otras variables como la temperatura del aire y la humedad relativa tienen un coeficiente de determinación bajo, $R^2=0,20$ y un $R^2=0,19$ respectivamente, lo que indican que no tienen una contribución importante al proceso de la evapotranspiración.

En otro análisis, se realizó la comparación de la ET calculada con ecuaciones empíricas de Penman-Monteith (Figura 4), Priestley-Taylor (Figura 5) y Hargreaves (Figura 6) con los datos observados. La ecuación Penman-Monteith versus la evapotranspiración

observada tiene un $R^2=0,17$, lo que quiere decir que esta ecuación no explica adecuadamente la variabilidad de la evapotranspiración observada. Además, el medio cuadrático tiene una $RMSE=0,32$, un coeficiente de Nash de $NSE=-14,01$ y $BIAS=0,56$.

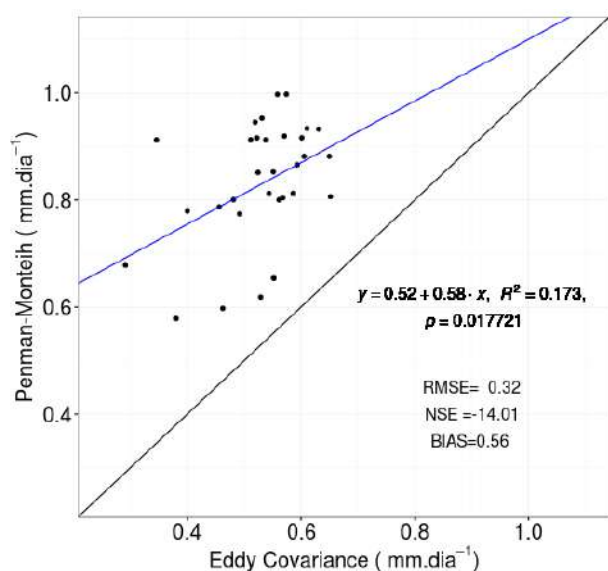


Figura 4. Regresión lineal de la evapotranspiración por la técnica Eddy covariance versus la ecuación empírica Penman-Monteith. En la parte inferior derecha se muestra el R^2 , RMSE, NSE y BIAS. Se observa la línea de regresión lineal (línea azul) y la línea de equidad (línea negra).

La ecuación Priestley-Taylor tiene un mejor coeficiente de determinación que Penman-Monteith ($R^2=0,22$); además, tiene mejores resultados en el $RMSE=0,18$ y $NASH=-4,04$, y tiene un BIAS mucho mejor (0,30).

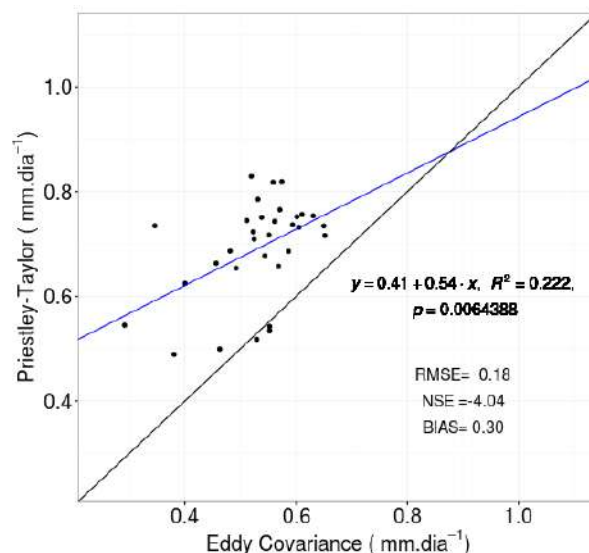


Figura 5. Regresión lineal de la evapotranspiración por la técnica Eddy covariance versus ecuación empírica Priestley-Taylor. En la parte inferior derecha se muestra el R^2 , RMSE, NSE y BIAS. Se observa la línea de regresión lineal (línea azul) y la línea de equidad (línea negra).

La ecuación Hargreaves tiene una mejor regresión que las dos ecuaciones anteriores con un $R^2=0,66$, sin embargo, el coeficiente de Nash es mucho más bajo que las otras ecuaciones, pero el RMSE es aceptable. Un valor RMSE aceptable significa que la media de la ET calculada no tiene una gran variación con los datos observados. Además es conveniente mencionar que la ecuación de Hargreaves se puede mejorar aplicando un coeficiente de calibración en la zona de estudio. Al parecer se muestra que las ecuaciones más parametrizadas como Penman-Monteith no explica adecuadamente la variabilidad de la evapotranspiración observada mientras que la ecuación Hargreaves que solo interviene la temperatura y radiación solar tiene un mejor performance.

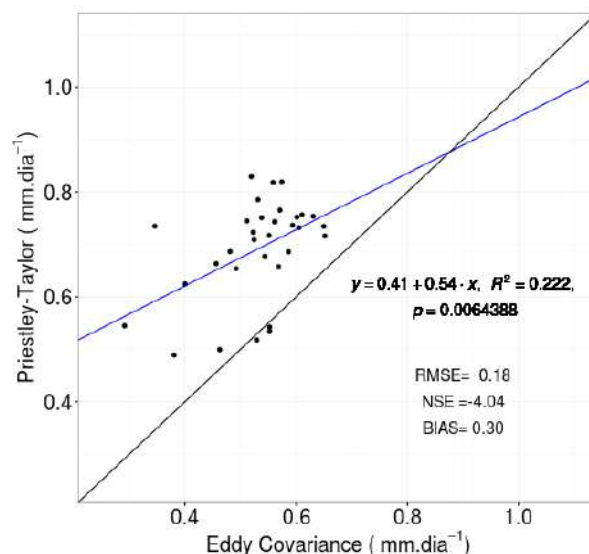


Figura 6. Regresión lineal de la evapotranspiración por la técnica Eddy covariance versus la ecuación empírica Hargreaves. En la parte inferior derecha se muestra el R^2 , RMSE, NSE y BIAS. Se observa la línea de regresión lineal (línea azul) y la línea de equidad (línea negra).

4. Conclusiones

La variable meteorológica con mayor influencia en la evapotranspiración es la radiación solar con un coeficiente de determinación de $R^2=0,9$.

Todas las ecuaciones empíricas (Penman-Monteith, Priestley-Taylor y Hargreaves) sobreestiman la evapotranspiración observada ($BIAS>0$).

La ecuación empírica que mejor se ajusta a la evapotranspiración observada es Hargreaves con un $R^2=0,66$.

5. Agradecimientos

Al Proyecto: “Estudio de los procesos físicos que controlan los flujos superficiales de energía y agua para el modelado de heladas, lluvias intensas y evapotranspiración en la sierra central del Perú”, por el financiamiento de este trabajo de investigación y al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por el apoyo mediante el acceso de datos de la Estación meteorológica de Huancayo.

Al Ing. Hans Segura y la Dra. Yamina Silva por sus valiosos comentarios y correcciones.

A todo el Área de SCAH y Observatorio de Huancayo por la facilidades prestadas.

6. Bibliografía

Allen, R.G., Periera, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements, Irrigation and Drainage Paper No. 56*. FAO, Rome, Italy, p. 300.

Burba, G; Anderson, D. 2010. *A brief practical guide to eddy covariance flux measurements*. Li-COR Inc., Lincoln.

García, M., Raes, D., Allen, R., Harbas, C., 2004. *Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (altiplano)*. *Agricultural and Forest Meteorology* 125, 67–82.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature*. *Applied Eng. in Agric.*, 1(2): 96-99.

Hellström and Mark (2006). *An embedded sensor network for measuring hydrometeorological variability within an alpine valley*. *Proceedings of the 63rd Eastern Snow Conference*. U. Delaware, Newark, DE, USA.

Higgins Aimee (2009). *Effects of land cover variability on evapotranspiration in the Llanganuco valley*. *Undergraduate Review*, 5, 18-26.

Priestley, C.H.B., Taylor, R.J., 1972. *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. *Monthly Weather Review* 100, 81–92.

Segura Cajachagua, Hans Mikhail (2014), Estudio del ciclo hidrológico de la Cuenca Amazónica mediante el uso de sensoramiento remoto: Análisis de evapotranspiración.

ESTADÍSTICAS DE OCURRENCIA DE TORMENTAS EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO

STATISTICS OF OCCURRENCE OF STORMS IN THE OBSERVATORY OF HUANCAYO

Jairo Michael Valdivia Prado

Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Facultad de Ingeniería Agraria y Ambiental
valdiviaprado.ing@gmail.com

Asesor: Yamina Silva, Ph. D.

Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e
Hidrosfera
IGP

Resumen

Utilizando la información de la estación meteorológica del Observatorio de Huancayo, el presente trabajo busca analizar el comportamiento temporal de las tormentas eléctricas y granizadas, su incidencia a través de los años, las fechas, estacionalidad y ciclo diurno; la información aquí analizada, comprende desde los años 1970 hasta el 2016.

Palabras clave: tormentas eléctricas, granizadas.

Abstract

Using the information from weather station of Huancayo Observatory, this paper seeks to analyze the temporal behavior of thunderstorms and hailstorms, its incidence through the years, dates, seasonal and diurnal cycle; the information is analyzed, ranging from 1970 through 2016.

Keywords: thunderstorms, hailstorms. Observatory of Huancayo.

1. Introducción

La cuenca del río Mantaro es altamente vulnerable a eventos meteorológicos extremos relacionados con la variabilidad climática, y de acuerdo con proyecciones recientes, esta vulnerabilidad se incrementaría en los próximos años debido al cambio climático (IGP, 2005c). Los eventos meteorológicos extremos constantemente generan desastres naturales que afectan a la población del país y a sus principales actividades económicas.

La agricultura se caracteriza porque aproximadamente el 70% se realiza bajo el sistema de secano, es decir, dependiente de las lluvias; además, existe una gran parcelación de la tierra con cerca de un 80% de parcelas pertenecientes a muy pequeños, pequeños y medianos productores que tiene como característica la diversificación de cultivos, lo que impide su inserción en los mercados más grandes, por ejemplo la exportación. Por otro lado, está diversificación es un mecanismo de protección ante eventos climáticos y meteorológicos extremos (Torres, 2008) y variaciones en el mercado.

Incluso pese a la diversidad de cultivos, los agricultores pueden verse gravemente perjudicados por eventos extremos como las granizadas o lluvias intensas, las cuales, en ocasiones, pueden afectar cientos de hectáreas, miles de toneladas de cultivos y generando pérdidas que pueden superar lo equivalente a 0.3 millones de soles (Giráldez, et al., 2012).

Debido a esta problemática, hay un gran interés por estudiar este tipo de fenómenos, entenderlos es fundamental para lograr disminuir la vulnerabilidad y mejorar la capacidad de adaptación de la población urbana y rural en el valle del río Mantaro

2. Desarrollo

2.1. Observaciones

Los datos son anotados diariamente por el observador de la estación meteorológica del Observatorio de Huancayo, en planillas climáticas que posteriormente son digitalizadas para su análisis, la información disponible consta de fecha, hora y en algunos casos duración de los eventos. En el presente trabajo se utilizó información desde el año 1958 hasta el año 2016.

2.1.1. Consideraciones de registro

El observador siguió los siguientes criterios antes de anotar una tormenta eléctrica o granizo en las planillas climáticas:

- Tormentas eléctricas: Que produzcan rayos,

relámpagos o truenos, cuyo núcleo se encuentre dentro de un radio de 15 km alrededor del observatorio.

- Granizadas: Son anotadas cuando se observa precipitación sólida, suelen ser muy localizadas así que éstas solo se registran cuando inciden sobre el Observatorio de Huancayo.

2.2. Metodología

La cuantificación de tormentas eléctricas y granizadas se realizó únicamente por la cantidad de eventos, no se consideró la duración de estos debido a limitación de datos disponibles.

En el presente trabajo se utiliza de definición convencional estadística de probabilidad, como la relación entre eventos favorables y eventos posibles, siendo los eventos posibles nuestra muestra total correspondiente.

3. Resultados

3.1. Serie histórica

Como se observa en la Figura 1, en los años analizados se puede observar comportamientos poco uniformes tanto para las granizadas como las tormentas eléctricas, siendo la media anual de ocurrencia de 36,22 para las tormentas eléctricas y de 3.12 para granizadas, sin embargo, antes del año 1963 los registros indican que no hubieron este tipo de eventos, lo cual podría tratarse un error por parte del observador, se observa también entre los años 1977 y 1984 una drástica disminución de las tormentas eléctricas y ausencia de granizadas. A partir del 1995 la ocurrencia de granizadas se muestra bastante constante, sin guardar mucha relación con las tormentas eléctricas.

3.2. Estacionalidad

Las tormentas eléctricas y los granizos pueden ocurrir a lo largo del todo el año, sin embargo tienen mayor ocurrencia en la temporada de lluvias, correspondiente a los meses entre setiembre y febrero, y siendo muy poco probable que ocurran en los meses de junio y julio, las estadísticas indican de que en caso ocurra cualquiera de los dos fenómenos aquí estudiados solo hay 2% de probabilidades de que ocurran en junio o julio, y estas probabilidades van aumentando mientras nos acerquemos al mes de diciembre con un 13% para las tormentas eléctricas, y un comportamiento más aleatorio para las granizadas pero alcanzado un 16% en diciembre.

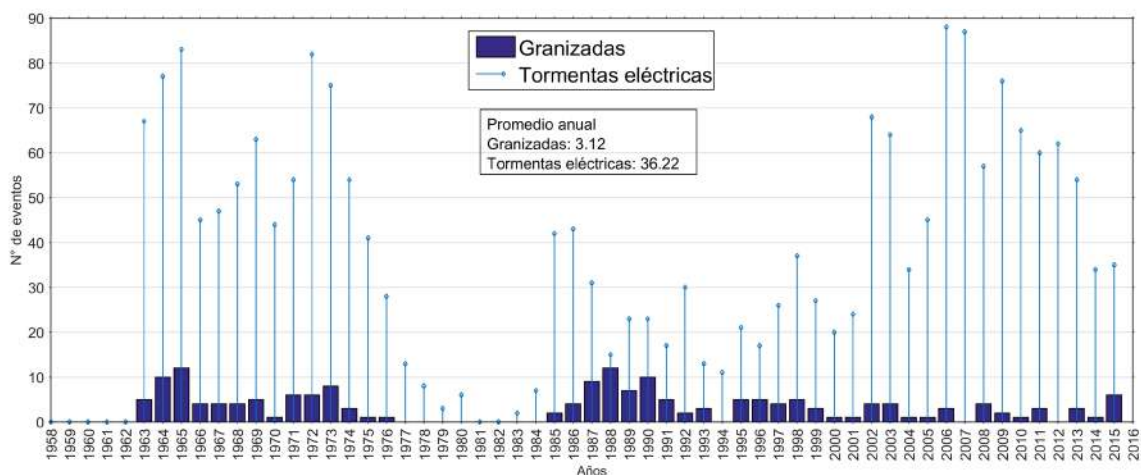


Figura 1. Serie histórica de tormentas eléctricas y granizadas (1958 - 2016).

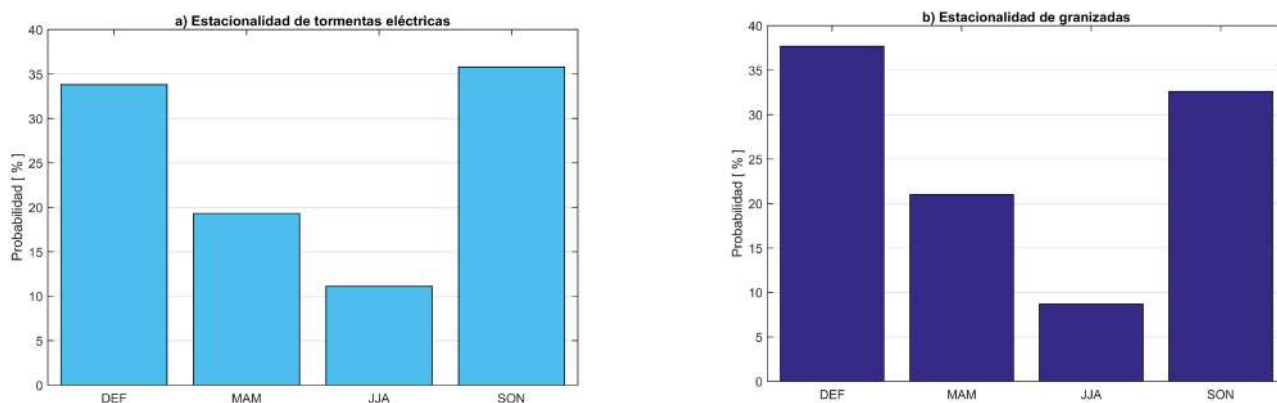


Figura 2. Distribución estacional de ocurrencia de tormentas eléctricas (arriba) y granizadas (abajo).

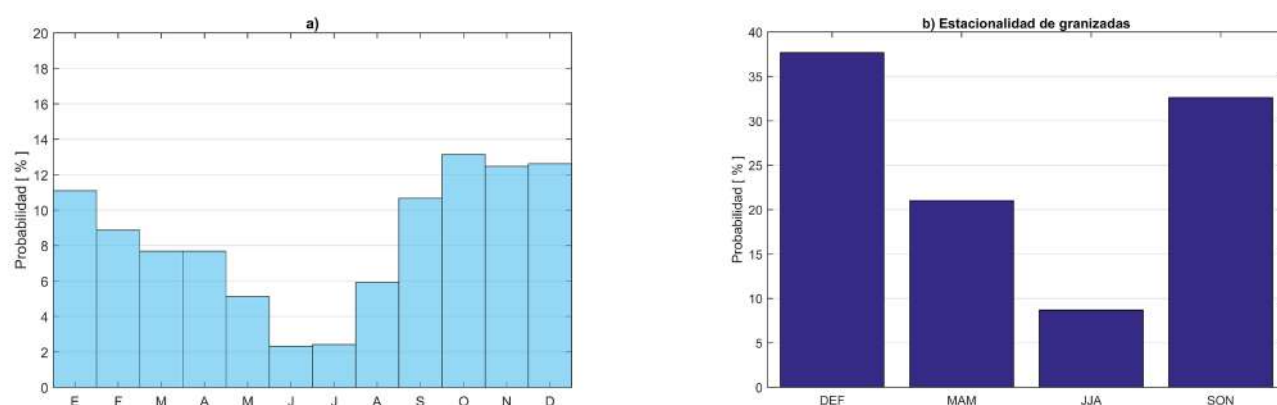


Figura 3. Distribución mensual de ocurrencias, a) tormentas eléctricas, b) granizadas.

1977 y 1984 una drástica disminución de las tormentas eléctricas y ausencia de granizadas. A partir del 1995 la ocurrencia de granizadas se muestra bastante constante, sin guardar mucha relación con las tormentas eléctricas.

3.2. Estacionalidad

Las tormentas eléctricas y los granizos pueden ocurrir a lo largo del todo el año, sin embargo tienen mayor ocurrencia en la temporada de lluvias,

correspondiente a los meses entre setiembre y febrero, y siendo muy poco probable que ocurran en los meses de junio y julio, las estadísticas indican de que en caso ocurra cualquiera de los dos fenómenos aquí estudiados solo hay 2% de probabilidades de que ocurran en junio o julio, y estas probabilidades van aumentando mientras nos acercamos al mes de diciembre con un 13% para las tormentas eléctricas, y un comportamiento más aleatorio para las granizadas pero alcanzado un 16% en diciembre.

3.3. Ciclo diurno

Las tormentas muestran un ciclo diurno constante, ya que los eventos aquí estudiados solo ocurren en la tarde, siendo la hora predominante después de las 16 horas y antes de las 18 horas, con probabilidad de ocurrencia mayor a 15%. Debido a que la probabilidad de ocurrencia de tormentas es mucho menor entre los meses de mayo y agosto (Figura 3), se hizo una estadística individual para esos meses y se comparó con el resto del año, y se puede notar que los meses secos presentan un rango menor en las horas de ocurrencia. Si nos encontramos entre los meses lluviosos y ocurre una tormenta eléctrica cerca del observatorio, tenemos solo 15% de probabilidades de que se dé a las 14 o 15 horas del día, mientras si estamos en los meses secos este evento tendría 25% de probabilidades de darse a las mismas horas; algo muy parecido ocurre con las granizadas, pero en este caso la hora propicia sería las 15 horas del día, en meses lluviosos hay 31% de probabilidades de darse a esa hora, y en los meses secos, la probabilidad aumenta a 43%.

4. Conclusiones

Existe una gran correlación entre la ocurrencia de eventos de tormentas eléctricas y eventos de granizos, esto se debe a que al momento de formarse un núcleo convectivo es necesaria la existencia de agua sólida para la formación de rayos, aunque posiblemente esta agua en forma de hielo no precipite en forma de granizo.

Verano es la estación en la cual más de estos eventos ocurren, no obstante, esta ocurrencia abarca más meses, ya que solo cuatro de los meses muestran una probabilidad inferior al 6%, los cuales son mayo, junio, julio y agosto.

Estos eventos ocurren siempre en antes del anochecer, las tardes son las horas propicias para su ocurrencia, debido a que se necesita un gradiente térmico bastante alto para la formación de núcleos convectivos y la radiación solar juega un papel importante.

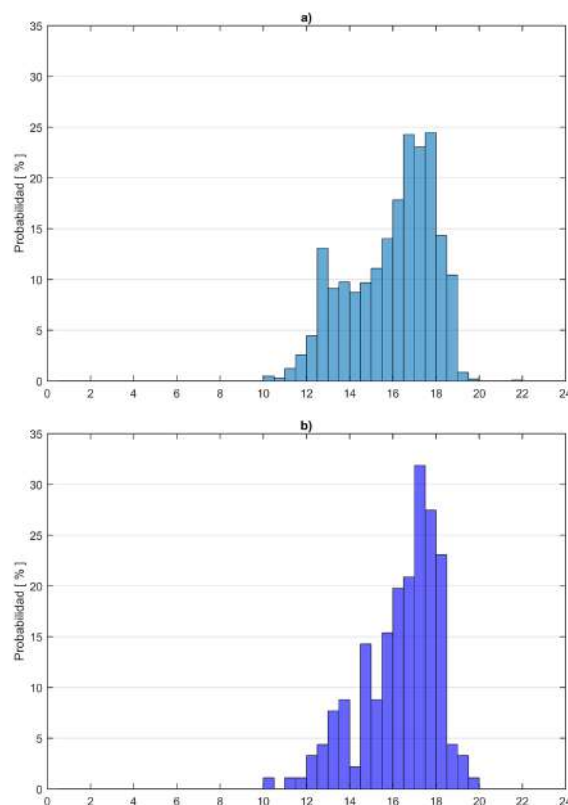


Figura 4. Ciclo diurno de tormentas, a) tormentas eléctricas, b) granizadas.

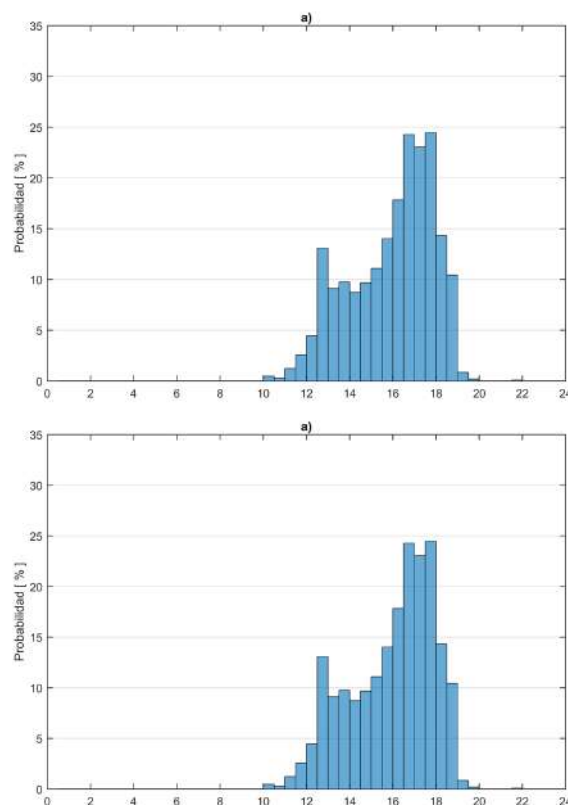


Figura 5. Comparación de meses secos y lluviosos en su ciclo diurno, a) ciclo diurno de tormentas eléctricas, b) ciclo diurno de granizadas

5. Recomendaciones

La forma tradicional de recolección de este tipo de información, nos deja bastantes limitaciones e incertidumbre; una de las principales cuestiones a considerar es que dependemos del criterio del observador, si él considera que una tormenta no está suficientemente cerca o suficientemente lejos para ser anotada o no, puede que tampoco se encuentre en cerca de la estación al momento de una granizada y que no haya podido completar el dato correctamente; este tipo de errores no nos permiten decir objetivamente que tenemos buenos datos.

Un claro ejemplo de este tipo de incertidumbres se puede notar en la Figura 1, si nos vamos de la actualidad hacia atrás en la serie histórica, podemos notar que la ocurrencia de granizos fue bastante regular y que luego ocho años atrás a partir del 1985 hay un notable descenso en las ocurrencias; es posible que estos datos sean correctos, o que se asemejen mucho a la realidad, sin embargo ocho años de ausencias de tormentas no es algo normal, lo cual podría ser motivo de estudio; esto se pone peor si retrocedemos a años anteriores a 1962, donde hubo una drástica anomalía que causó una total ausencia de tormentas o simplemente dejaron de tomarse datos en esas fechas. Por el momento no se dispone de información anterior a los años que figuran en la serie histórica.

En la actualidad este tipo de errores pueden ser evitados con el uso de instrumentos más sofisticados como el disdrómetro de parsivel, que puede diferenciar el tipo de precipitación y darnos datos más precisos acerca de su cantidad y duración.

6. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por el impulso que dar al avance de la investigación y la ciencia.

A Ph. D. Yamina Silva Vidal, por su amabilidad apoyo y orientación que me brinda, para poder seguir avanzando.

A mi familia, en especial a mi madre, que brindan constante e incondicionalmente su apoyo.

7. Bibliografía

Instituto Geofísico del Perú. (2005c). Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro. Cambio Climático / Evaluación Local Integrada de Cambio Climático para la Cuenca del Río Mantaro, Volumen 3. Lima, Perú: Fondo Editorial del Consejo Nacional del Medio Ambiente [CONAM].

Torres, J. (2008). Adaptación al cambio climático: de los fríos y los calores en los Andes. Vol. 1 (Colección Cambio climático y pobreza). Soluciones Prácticas-ITDG, 155 pp.

Giráldez, L., Y. Silva y G. Trasmonte, (2012). Impacto de las lluvias intensas en la agricultura del valle del Mantaro. Libro Manejo de riesgos de desastres ante eventos meteorológicos extremos en el valle del Mantaro. Volumen II. Resultados del proyecto MAREMEX - Mantaro, capítulo 4: Vulnerabilidad socioeconómica - sector agricultura. Editorial IGP

ESTUDIO DE LA PRECIPITACIÓN USANDO EL MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF) EN LA CUENCA DEL RÍO MANTARO

STUDY OF PRECIPITATION USING THE MODEL AND WEATHER RESEARCH FORECASTING (WRF) IN THE MANTARO RIVER BASIN

Alan Jesús García Rosales
Universidad Nacional Agraria La Molina
Facultad de Ciencias
jesusgarciabio@gmail.com

Asesor: Ph.D. Yamina Silva, Ph. D.
Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e
Hidrosfera
IGP

Resumen

En este estudio se presentan los resultados preliminares de las corridas realizadas con el WRF para el mes de febrero para el periodo del 2000 al 2012, utilizando dos dominios, 27 y 9km para la cuenca del Mantaro, siendo forzado con datos del NCEP FNL (Final) de 1° de resolución. Para la validación se usan datos observados de 20 estaciones meteorológicas durante el periodo de estudio, así como los productos 3B42 y 2A25 del TRMM. Los resultados indican que el modelo tiende a sobre estimar la precipitación en 3 veces para toda la cuenca con respecto al TRMM 2A25. A nivel interanual, el modelo tiene a reproducir mejor los años secos, siendo capaz de representar dos de los años más secos del periodo de estudio. Para el ciclo diurno, el modelo muestra un sesgo de una hora. Estos resultados nos indican que se requieren de más datos observados, para validar primeramente el TRMM, así como mejorar la resolución del modelo.

Palabras clave: modelo, dominios, ciclo diurno.

Abstract

In this study, the preliminary results of the simulations made with the WRF for the month of February for the period from 2000 to 2012, using two domains 27 and 9km to the Mantaro basin and being forced by data from NCEP FNL (Final) of 1 ° of resolution. For validation, 26 weather stations were used during the study period and data from the products 3B42 and 2A25 of TRMM. The results indicate that the model tends to overestimate precipitation in 3 times for the entire basin with respect to TRMM 2A25. A multi-yearly level, the model has to play better dry years, being able to represent two of the driest years of the study period. For the diurnal cycle, the model shows a lag of one hour. These results indicate that more data are needed to be observed, validate the TRMM data and improve model resolution.

Keywords: model, domains, diurnal cycle.

1. Introducción

El valle del Mantaro es altamente productivo y abastece con los principales productos alimenticios a la capital del Perú, Lima, por otro lado, la precipitación de la cuenca abastece a la hidroeléctrica del Mantaro (IGP, 2005). Sin embargo, la alta variabilidad climática y los eventos meteorológicos extremos afectan estas actividades. Con el objetivo de encontrar los mecanismos físicos responsables de la variabilidad de las precipitaciones en la cuenca del río del Mantaro, se utiliza el modelo Weather Research and Forecasting (WRF).

El uso de modelos atmosféricos regionales como el WRF es de vital importancia, dado a la escasez de estaciones y a las limitaciones de los radares sobre la zonas de los andes o de topografía compleja. Proporcionando una herramienta tanto para el estudio de fenómenos atmosféricos como al pronóstico de estos.

En este estudio se presentan los resultados preliminares de las corridas realizadas con el WRF para el mes de febrero en el periodo del 2000 al 2012, llegando a la resolución de 9km. Con el objetivo de validar el modelo con datos de estaciones meteorológicas y productos del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Además de evaluar la distribución espacial y temporal de la precipitación.

1.1. Modelamiento de las precipitaciones en la cuenca

1.1.1. Datos

Se utilizó los datos del análisis operacional global del NCEP FNL (Final), con resolución de 1° por 1°, y salidas cada 6 horas (los FNL están hechos por del GFS) para las variables meteorológicas.

Para los datos estáticos como la topografía y el uso de suelo se usaron los datos del United States Geological Survey (USGS).

1.1.2. Metodología

Los datos del NCEP FNL fueron procesados para reducirse a un dominio de 27km (primer dominio). El proceso de pasar de 110km a 27km está dentro de las funciones del WPS (parte del pre-procesamiento del modelo), específicamente esta tarea fue desarrollada por el programa metgrid, que recoge los datos de los modelos globales traducida por el software ungrib, y luego por interpolación se traslada los datos globales a cada dominio según la zona de estudio establecida, ejecutándose los programas real y wrf para finalmente generar las salidas de las simulaciones denominadas "wrfout"(fig. 1).

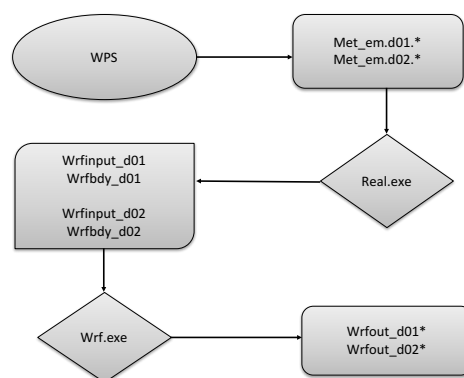


Figura 1. Esquema del proceso de corrida con tres dominios anidados. Elaboración propia.

dominios anidados. Elaboración propia.

1.2. Validación de la precipitación modelada

1.2.1. Datos

Se utilizaron dos grupos de datos para validar el modelo:

a. Datos observados de estaciones meteorológicas:

Precipitación diaria de 26 estaciones meteorológicas para el periodo del 2000 al 2012.

Precipitación cada 10 min de la estación automática de Huayao.

b. Datos estimados de los productos 3B42 y 2A25 versión 7 del TRMM:

Precipitación promedio multianual de la precipitación media (mm/hora) para el mes de febrero del producto 3B42 a 27km aproximadamente.

Precipitación promedio multianual de la precipitación media (mm/hora) para el mes de febrero del producto 2A25 a 5km aproximadamente.

1.2.2. Metodología

La simulación comprendió todos los meses de febrero en el periodo del 2000 al 2012. Los productos 3B42 (27km) y 2A25 (5km) fueron comparados con las salidas del WRF de 27km y 9km respectivamente, con estos datos se evaluó la intensidad y distribución espacial de la precipitación en la cuenca, las horas de ocurrencia de los máximos valores y el comportamiento del ciclo diurno. Para comparar el modelo con las estaciones se delimitó cuatro cajas que encierran a una cantidad mínima de cuatro estaciones, usando el promedio de las estaciones dentro de la cada caja se comparó con el

promedio de las grillas del modelo que lo conforman. Utilizando estadísticos como la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el sesgo (BIAS) aplicados en investigaciones anteriores (MauSSION et al., 2008).

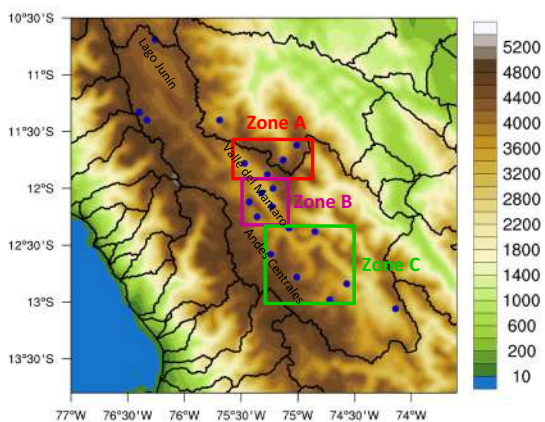


Figura 2. Altura del terreno (m) y distribución de las estaciones (puntos azules).

2. Resultados

2.1. Análisis estadístico por zonas

Determinando el acumulado por zonas, se mostró a la zona B con el menor RMSE acumulado (135.92 mm/día) y con un BIAS promedio de 6.20 mm/día, como se indica en la tabla 1. Es necesario recordar que los resultados presentados se refieren netamente a la validación cuantitativa, siendo esta muy difícil en obtener buenos resultados, debido a que el modelo tiende siempre a sobreestimar los datos observados (Mourre et al., 2015).



Figura 3. Magnitud acumulada del RMSE y BIAS para cada febrero dentro del periodo 2000-2012.

2.2. Variabilidad interanual

Según el SPI para las tres zonas se observó que tres años (2002, 2005 y 2007) son coincidentes con un valor mayor o igual a 0.5, mientras que en el año 2009 esta condición solo se cumple para la zona C y D (fig. 4). Debido a que algunos años fueron representados de manera opuesta a lo observado. Este error estaría asociado a los datos del NCEP FNL (Mourre et al., 2015).

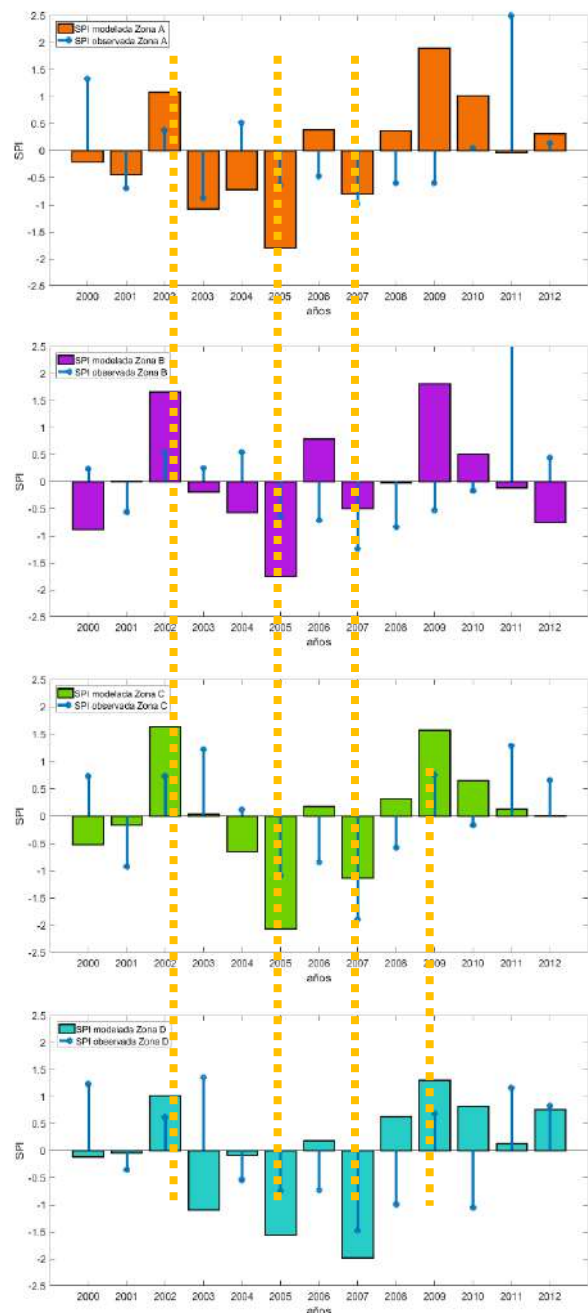


Figura 4. Variabilidad interanual de la precipitación para el mes de febrero

2.3. Variabilidad espacial

Se observó que el modelo sobreestima el doble de la precipitación estimada por el producto 3B42 del TRMM (fig. 5). No obstante, la distribución de precipitación sobre la costa, sierra y selva es coherentemente presentada por el WRF. Teniendo zonas secas en la parte costera, núcleos de precipitación sobre los andes e intensa precipitación sobre la selva. Representando correctamente el gradiente de precipitación longitudinal entre las condiciones de la amazonia, la influencia orográfica de los Andes y las condiciones frías secas de la costa del Pacífico como se presentó en investigaciones de L. Mourre et al, 2015.

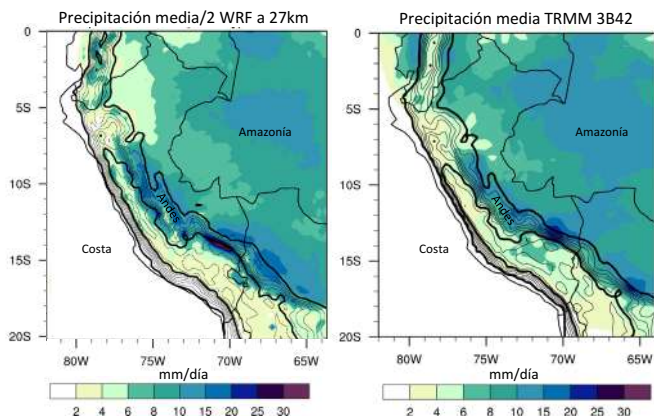


Figura 5. Promedio multianual (2000-2012) de precipitación media (mm/día) para febrero. Línea en negrita es referencia de 3500 msnm.

La comparación de la salida del WRF a 9km con el TRMM 2A25 interpolado a 9km, mostró que el modelo sobreestima en tres veces a los datos del TRMM. El modelo representó una distribución opuesta sobre la zona del valle del Mantaro y al sur de la cuenca (fig.6) con respecto a este producto. Una línea divisoria a los 4500 m mostró el contraste marcado, donde los valores máximos de precipitación sobrepasan los 4000 m.

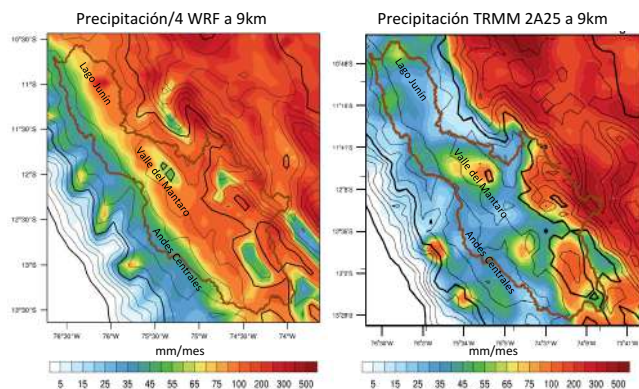


Figura 6. Promedio multianual (2000-2012) de precipitación acumulada (mm/mes) para febrero. Línea en negrita es referencia de 3500 msnm.

2.4. Ciclo diario

El modelo simuló adecuadamente el intervalo de horas de máxima precipitación en la cuenca (16-19hr), de acuerdo a los datos del TRMM. Para este caso no se pudo hacer una comparación especial debido a que la gráfica del TRMM representa el promedio de verano (fig. 7).

También se evaluó el ciclo diario para un punto, con la estación de Huayao ubicada en el observatorio de Huancayo del IGP. Que mostró la adecuada representación del pico máximo de la tarde entre las 14 y 19 horas, tal como se vio en la figura 8, pero con un retraso de una hora al valor máximo de precipitación observado (18hr). Para este caso el modelo también fue dividido por dos para una mejor comparación en las escalas.

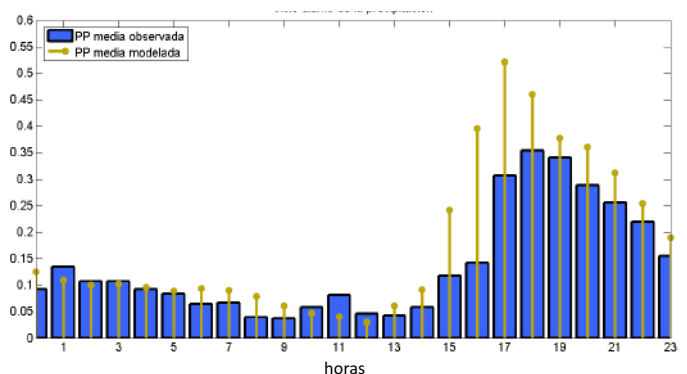


Figura 8. Ciclo diario de la precipitación para la estación de Huayao y los datos de WRF en el periodo 2000 al 2012.

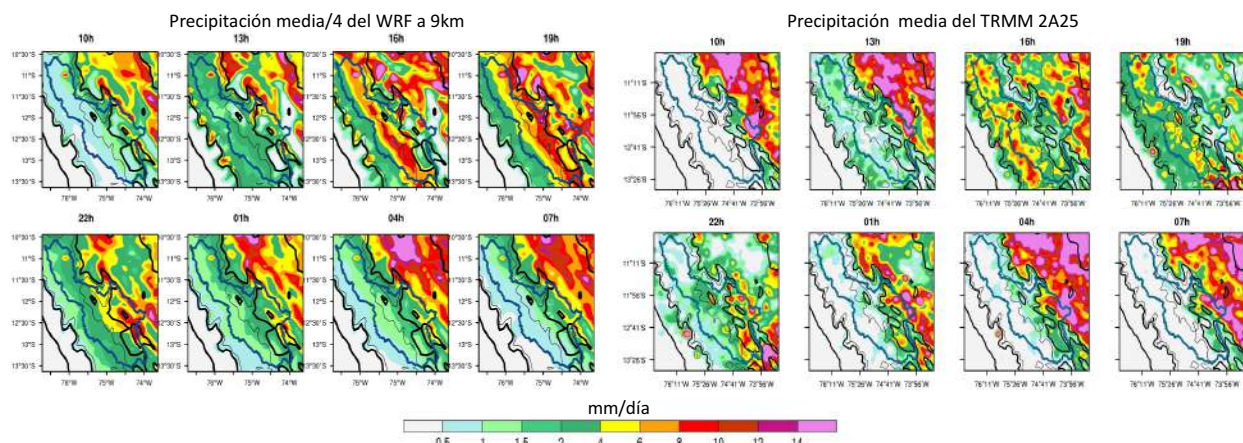


Figura 7. Ciclo diario de la precipitación media multianual (2000-2012) para el mes de febrero en el WRF, y verano DEF en el TRMM. Línea en negrita representa los 3500 msnm.

3. Conclusiones

La zona B ubicada al centro de la cuenca, que comprende gran parte del valle del Mantaro, fue la zona que obtuvo el menor RMSE, con un BIAS de 6.20. Concluyendo que a mayor resolución podrían obtenerse mejores resultados para el valle que es de gran importancia en la actividad agrícola (IGP 2005). -La variabilidad espacial de la precipitación que simula el modelo discrepa de la distribución representada por el TRMM 2A25. Pudiendo ser la causa la baja resolución temporal del producto 2A25, una de las principales desventajas al usar este producto (Chávez 2013). Dado que los datos del TRMM 2A25 solo muestran la precipitación para el mes de febrero, se podría estar perdiendo datos de precipitación sobre las montañas, que es observado por las estaciones.

Para el ciclo diurno de la precipitación se obtuvo mejores resultados. Mostrando claramente el rango de horas, donde ocurren los valores máximos que se dan en la tarde (16-19hr). Además se observó un retraso de una hora para el pico máximo de precipitación (18hr) según los datos de la estación de huayao.

4. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis. A mi asesora Yamina Silva por darme la oportunidad de desarrollarme como investigador, a la colaboración de la Dra. Clementine Junquas por compartir toda su experiencia en modelamiento, al Lic. Steven Chávez por el apoyo con los datos del TRMM y a mis amigos de SCAH por ser fuente de consulta.

5. Bibliografía

Chávez Jara, SP. 2013. *Caracterización de Tormentas en el Valle del Mantaro mediante Sensoramiento Remoto*. Tesis Lic. Física. Lima-Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú. 25-38, 46-57 p.

Espinoza, JC; 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.

Instituto Geofísico del Perú, (2005b). *Atlas Climático de precipitaciones y temperaturas en la Cuenca del río Mantaro*. Fondo Editorial CONAM Lima, Perú.

Maussion F; Scherer D; Finkelnburg R; Richters J; Yang W; and Yao T. 2011. *WRF simulation of a precipitation event over the Tibetan Plateau, China – an assessment using remote sensing and ground observations*. *Hydrology Earth System Sciences* 15: 1795–1817.

Mourre1, L; Condom1, T; Junquas, C; Lebel1, T; Sicart1, JE; Figueroa, R; Cochachin, A. 2015. *Spatio-temporal assessment of WRF, TRMM and in situ precipitation data in a tropical mountain environment (Cordillera Blanca, Peru)*. *Hydrology Earth System Sciences* 12: 6635–6681.

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., et al. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. Atmospheric Research. Meso-scale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO.

FUENTES DE HUMEDAD Y CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA EVIDENCIADAS A TRAVÉS DE INDICADORES ISOTÓPICOS ($\delta^{18}\text{O}$ Y δD) EN LAS PRECIPITACIONES DE LA CUENCA DEL ALTO MAYO

MOISTURE SOURCES AND ATMOSPHERIC CIRCULATION EVIDENCED THROUGH THE ISOTOPIC SIGNAL OF RAIN ($\Delta^{18}\text{O}$ AND ΔD) IN THE ALTO MAYO BASIN

Angela Ampuero Grández
Universidad Nacional Agraria la Molina
Facultad de Ingeniería Agrícola
Angela.ampuero@gmail.com

**Asesores: Dr. James Apaéstegui;
Dr. Jhan Carlo Espinoza**
Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e
Hidrosfera
IGP

Resumen

En el presente trabajo se analizaron 45 muestras de lluvia colectadas dos veces al mes durante el periodo de 06/2012 a 06/2014 en la estación Palestina (77.3°W, 5.9°S, 870 msnm). La información isotópica se evaluó en términos de parámetros climáticos a nivel local (cuenca del Alto Mayo) y regional (Sudamérica) utilizando datos observados en estaciones, datos satelitales y reanálisis atmosférico. El trabajo demostró que los parámetros climáticos regionales son los que dominan la señal isotópica en Palestina. La variabilidad de las fuentes de humedad y la intensidad de la precipitación en el camino de los flujos de humedad pueden explicar hasta 52% de la variabilidad de la señal isotópica. Por su parte, el exceso de Deuterio (Dxs) demostró su potencial aplicación como trazador de reciclaje de humedad en la cuenca Amazónica.

Palabras clave: isótopos estables del agua, precipitación, reciclaje de humedad, Alto Mayo, Amazonía.

Abstract

Here we present the analysis of 45 rain samples collected twice a month during the period from 06/2012 to 06/2014 in the Palestina station (77.3°W, 5.9°S, 870 masl). We assess the isotopic information in terms of climatic parameters at local (Alto Mayo) and regional (South America) scales, using observed data, satellite data and atmospheric reanalysis. This work shows that climatic parameters at regional level govern the isotopic signal in the Palestina station. The variability of moisture sources and the intensity of precipitation in the way of moisture fluxes can explain 52% of the isotopic variability. Likewise, this work highlights the potential application of Dxs as moisture recycling proxy in the Amazon.

Keywords: stable water isotopes, precipitation, precipitation recycling, Alto Mayo, Amazon.

1. Introducción

En la actualidad se cuenta con diferentes bases de datos que incluyen información de estaciones meteorológicas convencionales, información satelital y reanálisis atmosféricos. Si bien esta información ha permitido comprender mejor el clima actual, el conocimiento de los procesos que controlan el clima sudamericano aún está incompleto. En este sentido, el desarrollo de herramientas que brinden información adicional a los parámetros climáticos tradicionales (pe: precipitación, temperatura, viento, humedad relativa, etc.), podría facilitar nuevos análisis y avances en el entendimiento de los mecanismos del sistema climático e hidrológico.

Las investigaciones preliminares basadas en los datos de GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) revelaron que la composición o señal isotópica de la lluvia, varía espacial y temporalmente. Estos cambios responden al proceso de fraccionamiento isotópico mediante el cual la abundancia de un isótopo en el agua varía durante los cambios de fase (Lachniet, 2008) que acompañan el ciclo hidrológico.

Estudios posteriores, revelaron asociaciones empíricas entre la señal isotópica ($\delta^{18}\text{O}$) y parámetros meteorológicos tales como precipitación y temperatura (Dansgaard, 1964). Por ejemplo, Vuille et al. (2003) expone que en varios lugares ubicados en la región tropical y subtropical de Sudamérica, lluvias más intensas resultan en señal isotópica más negativa en escala interanual.

Por otro lado el análisis del exceso de Deuterio (Dxs) señaló su posible relación con procesos como el reciclaje de humedad (Salati, 1979). El Dxs es un parámetro derivado de los efectos del fraccionamiento isotópico cinético durante la evaporación en la fuente de humedad, que puede ser el océano o el bosque, y se define como $\text{Dxs} = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ (Dansgaard, 1964).

En la Amazonía, especialmente en el Perú, existen pocas observaciones de isótopos de la lluvia, lo que limita el conocimiento completo de ellos y su aplicación en estudios hidro-climáticos en la región. En tal sentido, este trabajo busca analizar el registro isotópico obtenido en la estación Palestina, ubicada en la cuenca del Alto Mayo, a fin de aprovechar esta herramienta en nuestra región, que aun es poco explorada. El primer objetivo fue analizar la señal isotópica de la lluvia ($\delta^{18}\text{O}$) observada al noreste de los Andes peruanos, en la estación Palestina (77.3°W , 5.9°S , 870 msnm - Figura 1) y su relación con parámetros climáticos a nivel local y regional. El segundo objetivo fue la evaluación del Dxs observado en Palestina, como trazador de reciclaje de humedad a nivel regional amazónico.

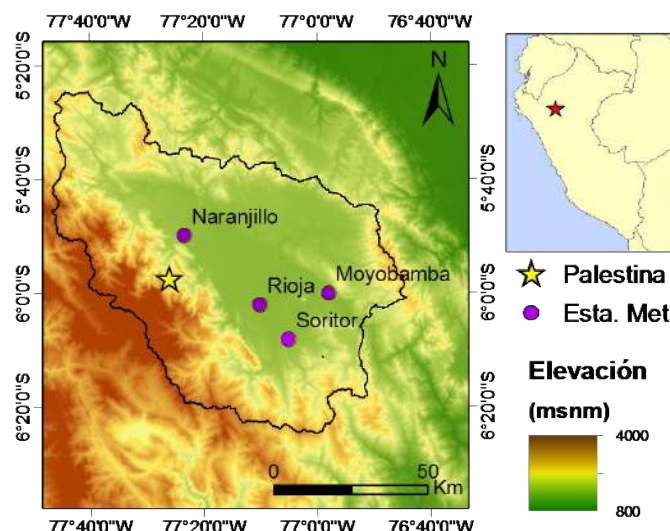


Figura 1. Área de estudio: Cuenca del Alto Mayo, estación Palestina de monitoreo de isótopos (estrella) y estaciones meteorológicas de SENAMHI (círculos).

2. Metodología

2.1. Datos isotópicos

El registro isotópico se generó a través de una campaña de monitoreo llevada a cabo en la estación Palestina del 01/06/12 al 01/06/14. Para esta campaña se utilizó un colector de isótopos tipo totalizador diseñado para captar y almacenar la lluvia, evitando la evaporación. Las muestras se colectaron los días 1 y 16 de cada mes, cada una de las cuales integra la composición isotópica de todos los eventos de lluvia ocurridos entre cada muestreo. En total se obtuvo 45 muestras de agua que se analizaron en laboratorio para $\delta^{18}\text{O}$ y δD .

2.2. Datos meteorológicos

A nivel local, se utilizó información de precipitación y temperatura observada en estaciones de SENAMHI ubicadas en el Alto Mayo (Rioja, Moyobamba, Naranjillo y Soritor—Figura 1). Con estos datos se calcularon composiciones de 15 días aproximadamente de manera que coincidan con los datos isotópicos. Estas composiciones se compararon con el registro isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ mediante el método de correlación lineal.

Los análisis regionales consistieron en la identificación de las fuentes de humedad y el análisis de los efectos de la lluvia regional en la señal isotópica del Alto Mayo. Para identificar las principales fuentes de humedad, se calcularon las retro trayectorias de los vientos utilizando el modelo HYSPLIT de la NOAA con datos de reanálisis de ERA Interim. A fin de identificar las áreas convectivas con mayores efectos sobre la señal isotópica de Palestina, se comparó el registro isotópico con la precipitación utilizando datos de precipitación de TRMM3B42.

La evaluación del exceso de Deuterio (Dxs) como trazador de reciclaje de humedad se realizó utilizando información de calor latente (LE), el cual es un indicador de evapotranspiración. La información de LE se obtuvo de la base de datos de la red de LBA, la cual opera torres de flujo ubicadas en la Amazonía de Brasil y presenta datos entre 1999 y 2006. Debido a la falta de datos sobre el periodo común se comparó el ciclo anual estandarizado de ambos parámetros para el todo el periodo que cuenta con datos.

3. Resultados y Discusiones

3.1. Análisis exploratorio de la señal isotópica

La composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ de la lluvia en Palestina tiene un valor promedio de -7‰ con variaciones de -13.72‰ a -0.61‰ y desviación estándar de 2.94‰ (Figura 2).

Resalta una aparente relación entre la señal isotópica y el régimen de lluvia. En la temporada de lluvia (septiembre - mayo), la señal isotópica fue más fraccionada (los valores isotópicos fueron más negativos), con el 60% de los datos de $\delta^{18}\text{O}$ menores que el promedio del registro. En esta temporada, los datos isotópicos configuran una estructura de doble pico que representan los periodos en los que la señal isotópica fue más negativa. Por otro lado, durante la temporada de estiaje (entre junio y septiembre) la señal isotópica se incrementa gradualmente. Este incremento resulta en una señal isotópica más pesada, con el 80% de los valores isotópicos mayores que promedio.

isotópica en nuestra área de estudio; sin embargo, resalta que los valores isotópicos más fraccionados acompañan los picos de precipitación. Estos resultados confirman lo expuesto en Gat (2001), donde se sugiere que para intensidades de lluvia mayores que 20 mm/mes, como es el caso de la cuenca del Alto Mayo, no hay un efecto de la cantidad de lluvia consistente.

Por otro lado, se observó correlación entre las temperaturas mínimas en superficie y la señal isotópica ($r=-0.49$, $p<0.1$). Considerando que los procesos de fraccionamiento isotópico acompañan la condensación de las gotas que precipitan, tiene sentido observar una señal isotópica más negativa durante la temporada cálida ya que en dicha época ocurren las mayores lluvias.

3.3. Análisis de los parámetros regionales en la señal isotópica

3.3.1. Variabilidad de las fuentes de humedad

Durante el verano austral (Figura 3a), los vientos que alcanzan la cuenca del Alto Mayo provienen principalmente del Atlántico tropical norte. El flujo de humedad ingresa al continente, pasando sobre Venezuela y Colombia, sin precipitación significativa sobre estas áreas. Solo cuando el flujo de advección ingresa a la cuenca amazónica por la frontera entre Perú y Colombia ocurre convergencia. En otras palabras, durante la mayor parte de su recorrido, las masas de aire no experimentan procesos de precipitación importantes, lo cual preserva la señal

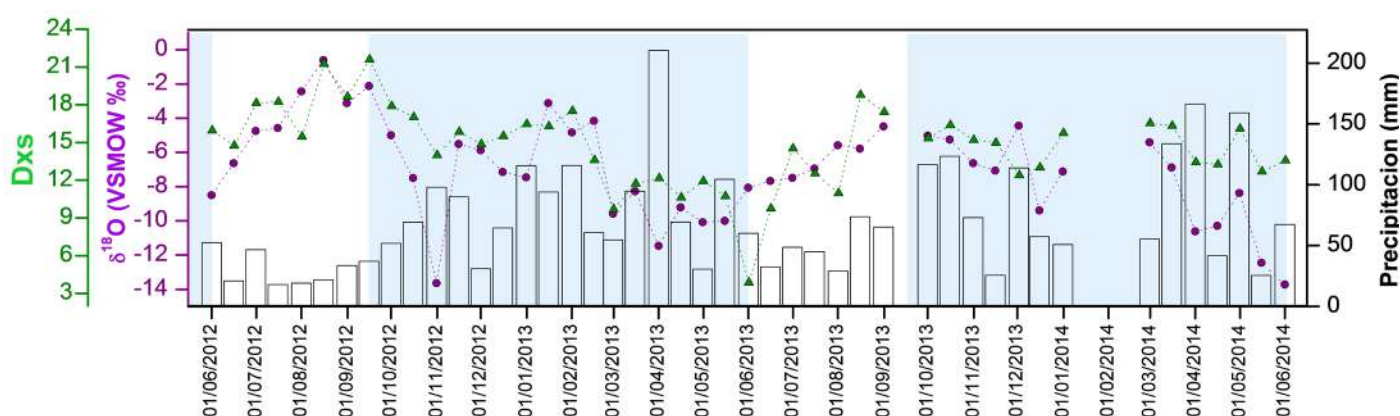


Figura 2. Registro isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ de la lluvia de la estación Palestina (círculos), exceso de Deuterio (triángulos), y precipitación promedio en la cuenca del Alto Mayo (barras). Las sombras representan la época de lluvia en el Alto Mayo.

3.2. Análisis de los parámetros locales en la señal isotópica ($\delta^{18}\text{O}$)

Existe una débil relación entre la lluvia a nivel local y la señal isotópica ($r=-0.27$, $p<0.1$). Esto indica que la lluvia local no es el principal control de la señal

isotópica de la fuente de humedad oceánica que, en principio, isotópicamente más pesada que las aguas continentales. Estas condiciones pueden reflejarse en el registro isotópico, a través de una señal más enriquecida en isótopos pesados.

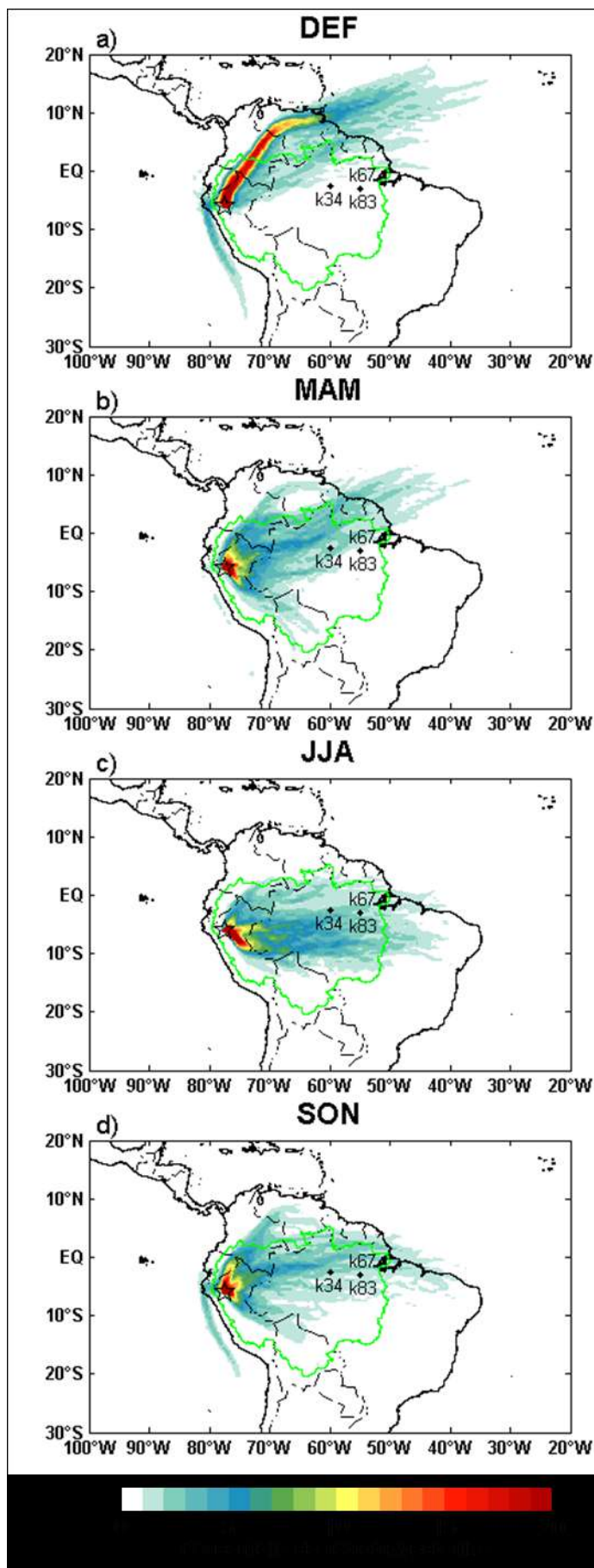


Figura 3. Retro trayectorias de los vientos desde la estación Palestina para el periodo del 01/06/2012 a 01/06/2014 y torres de flujo de LBA (K34, K83 y K67). La línea verde delimita la cuenca amazónica.

Durante el invierno austral (Figura 3c), las parcelas de aire son transportadas principalmente sobre el el bosque amazónico, área que en esta temporada actúa como fuente significativa de vapor a través de procesos sucesivos de reciclaje de humedad. Estas condiciones podrían favorecer el enriquecimiento de la señal isotópica, tal como se observa en el registro de Palestina.

Otoño y primavera (Figura 3b y 3d) son temporadas de transición durante las que hay gran variabilidad en los patrones de circulación atmosférica. Durante ambas temporadas, procesos convectivos acompañan la advección de las parcelas de aire, especialmente en la región norte de la cuenca amazónica. Esto puede explicar los picos de valores isotópicos negativos que ocurren en estas temporadas, a través de la liberación progresiva de isótopos pesados que acompaña la precipitación.

3.3.2. Efecto de la lluvia en el camino de los flujos de humedad

Durante la temporada de lluvia, se identificó una zona convectiva relevante ubicada en Colombia, centrada en 2.5°N y 72°O, justo en el camino de los flujos de humedad (Figura 4). Los coeficientes de correlación entre el registro isotópico en Palestina y la precipitación sobre esta área son significativos, alcanzado el valor máximo de $r=-0.72$ ($p<0.05$).

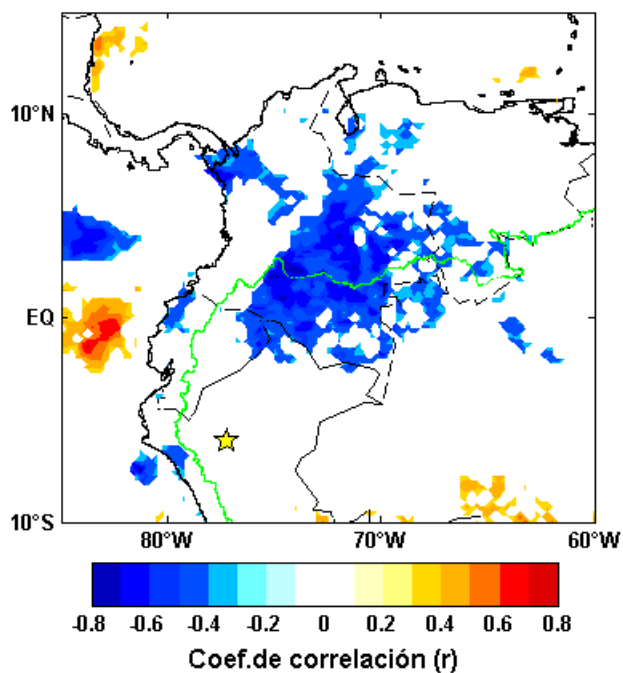


Figura 4. Correlación entre la señal isotópica de la lluvia en la estación Palestina y la precipitación en cada punto de grilla ($p<0.05$).

La relación hallada indica que la precipitación sobre esta área de Colombia tiene mayores efectos en la señal isotópica de Palestina que los controles locales. Es decir que cuando el flujo de humedad pasa por esta región, el fraccionamiento isotópico del vapor transportado, determina la señal isotópica que se observa en Palestina.

3.4. Análisis del exceso de Deuterio (Dxs)

El Dxs en Palestina registró un valor promedio de 14.7‰, con variaciones de 3.9‰ a 21.6‰ y desviación estándar de 3.23‰ (Figura 2). Durante la temporada de estiaje, el Dxs se incrementa gradualmente hasta alcanzar los valores más altos entre agosto y septiembre mientras que durante la temporada de lluvia este disminuye.

El incremento de Dxs en Palestina durante el invierno, cuando el flujo de humedad pasa sobre la Amazonía sugiere influencia de procesos asociados al reciclaje de humedad sobre el bosque, el cual es

muy importante en el balance hídrico de la región. Se debe considerar que el reciclaje de humedad es un proceso complejo ya que depende de varios factores como el transporte de humedad a nivel regional y la evapotranspiración. En este sentido, la similitud entre los ciclos anuales de Dxs en Palestina y LE en las torres K34, K67 y K83 (Figura 3 y 5) sugiere que la evapotranspiración en áreas de bosque húmedo tropical tiene efectos sobre la señal isotópica en Palestina.

Resalta la sincronía de los mínimos valores de LE (de 130 a 205 Wm⁻²) y Dxs (3.9‰) al final de la temporada seca, justo cuando las torres interceptan los flujos de humedad que alcanzan el Alto Mayo. La migración hacia valores mayores de Dxs ocurre durante el invierno austral. Aun cuando los caminos preferentes de los flujos de humedad que llegan a Palestina no son los mismos que circulan por las torres de flujo, las evidencias indican que LE a nivel de la cuenca

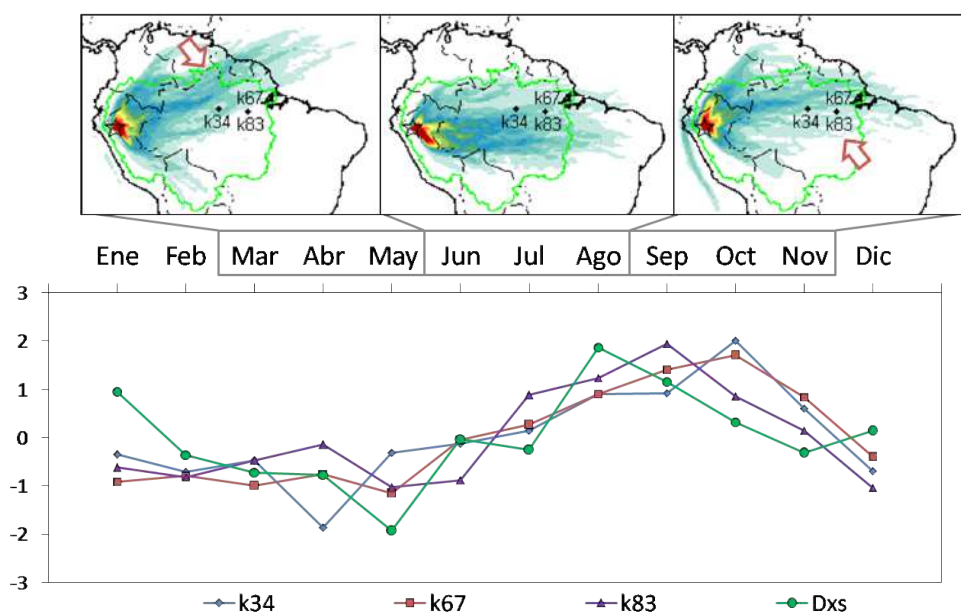


Figura 5. Los mapas muestran los flujos de humedad en MAM, JJA y SON (sombras) y las torres de flujo (puntos negros). Las flechas indican la migración de los vientos de norte a sur en MAM y de sur a norte en SON. El gráfico muestra el ciclo anual estandarizado de exceso de Deuterio (Dxs) en Palestina y calor latente (LE) en las torres.

Amazónica se incrementa durante el invierno austral con picos al final de la temporada de estiaje, entre los meses de septiembre y noviembre (Segura, 2014). Este incremento en el flujo de LE es registrado tanto en las torres (de 155 a 230 Wm⁻²) como en los datos de Dxs, mostrando un comportamiento regional coherente con lo esperado. Por otro lado, la disminución de los valores de Dxs observada en Palestina durante los meses SON, acompaña la migración de los regímenes de los vientos del Sur al Norte.

4. Conclusiones

Entre las principales conclusiones podemos determinar que la precipitación y temperatura local explican pobremente la variabilidad de la señal isotópica ($r^2=0.24$). En contraste, los parámetros regionales demostraron gobernar la señal isotópica en Palestina a través de la circulación atmosférica y la intensidad de las lluvias en los caminos de los flujos de humedad. Los cambios en la circulación atmosférica resultan en diferentes fuentes de humedad, oceánicas y continentales, que dominan en distintas épocas del año. Los procesos atmosféricos en los caminos de advección desde estas fuentes

de humedad hasta el Alto Mayo son acompañados por procesos de fraccionamiento isotópico que son coherentes con lo observado en el registro isotópico de la estación Palestina. Resalta la correlación entre las lluvias sobre Colombia y la señal de $\delta^{18}\text{O}$ ($r^2=0.52$) durante la temporada de lluvia, cuando los flujos de humedad que llegan al Alto Mayo pasan por esa región. Esta relación indica que cuando la precipitación es más intensa sobre Colombia, la señal isotópica que llega al Alto Mayo es más fraccionada. Por su parte, la similitud entre los ciclos anuales de Dxs de Palestina y la evapotranspiración en el bosque sugiere que Dxs es un potencial trazador de reciclaje de humedad a nivel regional amazónico.

5. Agradecimientos

A mi familia por su continuo apoyo y soporte. Al Dr. Apaéstegui por sus enseñanzas y asesoría para el desarrollo de este trabajo. Al LMI-PALEOTRACES y al observatorio HYBAM por hacer posible la generación de los datos isotópicos. A mis amigos del Instituto Geofísico del Perú por sus consejos y sugerencias.

6. Bibliografía

Dansgaard, W. (1964). *Stable isotopes in precipitation*. *Tellus* 16, 438–468.

Lachniet, MS. (2009). *Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values*. *Quaternary Science Reviews*, 28(5-6), 412–432. <http://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.10.021>

Gat, J.Mook, W. Meijer, H. (2000). *Environmental isotopes in the hydrological cycle, Principles and Applications. Vol 2. Atmospheric Water*, (ed W.G. Mook), IHP-V, Technical documents in Hydrology N°39 Vol. 2 UNESCO, Paris.

Salati, E. Dall'olio, A. Matsui, E. Gat, JR. (1979). *Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study*. *Water Resource Research*, 15:1250–1257.

Segura H. (2014). *Estudio del ciclo hidrológico de la cuenca Amazónica mediante el uso de sensoramiento Remoto: análisis de evapotranspiración*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Agraria la Molina.

Vuille, M. (2013). *Climate change and water resources in the tropical Andes*. *Interamerican Development Bank Technical Note No. IDB-TN-515*. *Journal of Hydrometeorology*, doi: 10.1175/JHM-D-12-0100.

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE SEQUÍAS EN LA CUENCA ANDINO-AMAZÓNICA MEDIANTE ÍNDICES DE SENSORAMIENTO REMOTO

SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF DROUGHT IN THE ANDEAN-AMAZON BASIN USING REMOTE SENSING INDEX

Omar Efrain Gutierrez Cori
Universidad Nacional Agraria la Molina
Maestría en Recursos Hídricos
hidrogis.ingenieros@gmail.com

Asesores: Dr. Jhan Carlo Espinoza;
Ing. Hans Segura
Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e
Hidrosfera
IGP

Resumen

Este estudio analiza los impactos de las sequías en la cuenca Andino-Amazónica durante los últimos 10 años. Se utilizaron datos de los satélites TERRA y TRMM que proporcionan información de cobertura vegetal (MOD13), temperatura de superficie (MOD11) y precipitación (3B43). A partir de estos se han desarrollado tres índices para el análisis del comportamiento interanual de las sequías: el Índice de condición de Precipitación (PCI), de Condición de Temperatura (TCI) y de Condición de Vegetación (VCI); los que sintetizan el déficit de precipitación, el estrés térmico del suelo y el estado de la vegetación en un proceso de sequía, respectivamente. En los años 2005 y 2010, los índices muestran condiciones de sequías severas, con una clara disminución en la precipitación, incremento en la temperatura superficial y disminución en las condiciones de vegetación en comparación a otros años. Un análisis a escala de cuenca muestra que durante la sequía del 2005 (2010) alrededor de un 30% (50%) del área de la Cuenca Amazónica Peruana estuvo en condiciones de sequía extrema.

Palabras clave: índices de sequía, cuenca andino-amazónica, sensoramiento remoto.

Abstract

This study analyzes the impacts of droughts in the Andes-Amazon basin during the last 10 years. TERRA and TRMM satellites data provide vegetation cover information (MOD13), surface temperature (MOD11) and precipitation (3B43). From these we developed three indices that characterize the droughts conditions: the index of Precipitation condition (PCI) Temperature condition (TCI) and Vegetation condition (VCI); which synthesize the precipitation deficit, thermal stress of soil and vegetation conditions on a drying process, respectively. In 2005 and 2010, the indices show severe drought conditions, with a clear decrease in precipitation, increase of surface temperature and decrease in vegetation conditions compared to other years. A basin scale analysis shows that during the drought of 2005 (2010) around 30% (50%) of the area of the Peruvian Amazon Basin was characterized by extreme drought.

Keywords: drought index, andean-amazon basin, remote sensing.

1. Introducción

Las sequías son uno de los desastres naturales más graves debido a los daños que causan en la sociedad (Federal Emergency Management Agency, 1995) y los ecosistemas (Brienen et al., 2015).

Recientes investigaciones evidencian la ocurrencia de sequías extremas en la región Amazónica, las que son más frecuentes desde las últimas décadas (Marengo y Espinoza, 2015), como las ocurridas en los años 1998, 2005 y 2010. Las sequías produjeron daños en la agricultura y los ecosistemas amazónicos (Lewis et al., 2011; Espinoza et al., 2011).

La sequía puede ser monitoreada de manera efectiva mediante índices desarrollados a partir de registros largos de información meteorológica, aunque el uso de estos para áreas extensas es limitado, ya que los datos observados por lo general son insuficientes y dispersos. Una alternativa a este problema es el uso de índices basados en observaciones satelitales para un monitoreo efectivo de las sequías (Rouse et al., 1974). Uno de los más utilizados es el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), ampliamente utilizado para la evaluación de las condiciones de sequía en la vegetación (Wang y Qu 2007). En la cuenca amazónica, algunos estudios han puesto en evidencia la utilidad de estos índices para el monitoreo del estado del bosque (Huete et al., 2006).

En este estudio se analizan tres índices calculados a partir de información satelital para el mejor entendimiento del comportamiento interanual de las sequías en la Cuenca Andino-Amazónica.

2. Datos y Métodos

2.1. Área de Estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca de la Amazonía peruana delimitada hasta la estación de Tabatinga (Brasil) cerca de la triple frontera entre Perú, Colombia y Brasil (ver Figura 1). Esta región presenta diferentes

regímenes de lluvias debido a su extensión latitudinal y la presencia de los Andes (Espinoza et al., 2009a).

2.2. Datos de sensores remotos

2.2.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es un índice que permite estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación en base a mediciones de sensores remotos, y es ampliamente utilizado para

el monitoreo del vigor de la vegetación terrestre y las sequías (Wang y Qu 2007). Se produce mediante el cálculo del cociente normalizado de la banda del infrarrojo cercano y la banda del rojo.

$$NDVI = \frac{R_{IRC} - R_R}{R_{IRC} + R_R}$$

Dónde:

RIRC y RR corresponden a los valores de reflectancia de la superficie para las bandas del infrarrojo cercano y rojo (Tucker, 1979).

Los productos MOD13 del sensor Modis proporcionan información de NDVI. Para este estudio se ha utilizado el producto MOD13C1 para el periodo 2001-2014, de 0.05° de resolución espacial.

2.2.2. Temperatura de superficie (LST)

El producto MOD11 del sensor Modis, proporcionan información de temperatura superficial (Land Surface Temperature) al contacto entre la cobertura y la atmósfera utilizando 7 bandas del infrarrojo medio y térmico (Wan y Li, 1997).

Para el caso de estudio se ha utilizado los productos MOD11A2 de 1km de resolución espacial. Información cada 8 días y con un remuestreo a 0.25° para el periodo de 2001-2014.

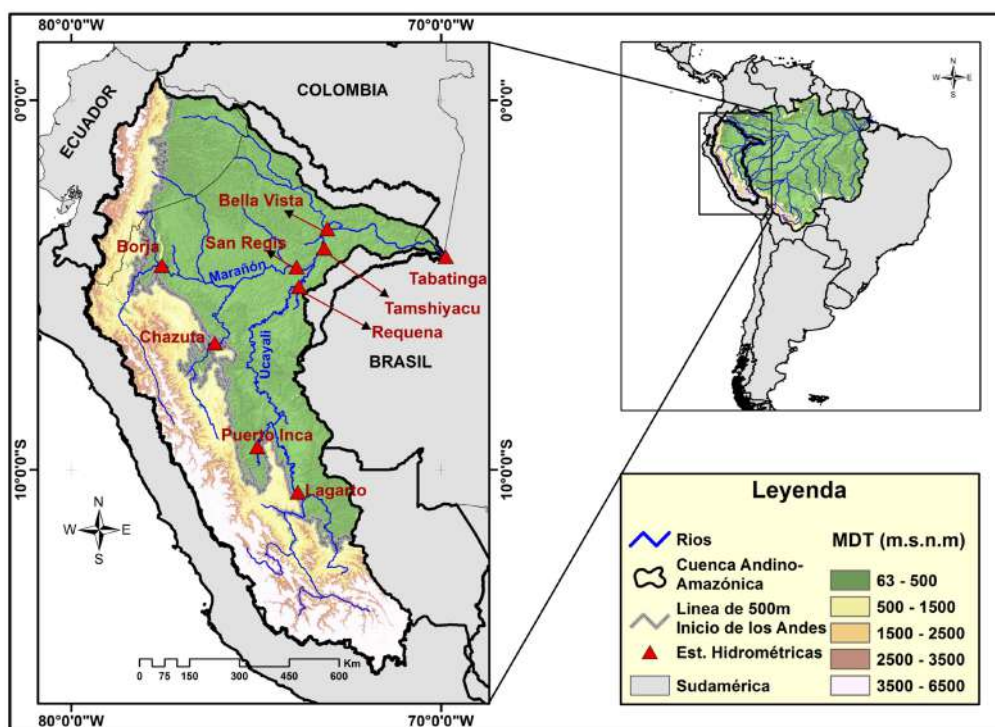


Figura 1. Ubicación de la cuenca amazónica delimitada hasta la estación de Tabatinga. El gradiente altitudinal se muestra a partir del modelo digital de elevación del SRTM a 90m de resolución. Se muestra la red de drenaje y la línea de los 500m.

2.2.3. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

Se ha utilizado el producto 3B43 del TRMM para el periodo del 2001-2014 (Huffman et al., 1997) proporcionando información de precipitación (mm/h) para cada mes a una resolución espacial de 0.25°.

2.3. Desarrollo de Índices de sensoramiento remoto

Se han desarrollado y adaptado tres índices a partir de datos obtenidos de los sensores remotos descritos anteriormente, que nos permiten representar condiciones que van desde húmedas hasta condiciones secas en nuestra área de estudio

2.3.1. Índice de Condición de Vegetación (VCI)

Una sequía extrema debilita el crecimiento de la vegetación y da lugar a un NDVI bajo; por otro lado, un NDVI alto representa una alta actividad fotosintética de la vegetación, existiendo condiciones ambientales favorables para su crecimiento. El VCI es el mejor indicador de estrés hídrico basado en las mediciones de NDVI. Es definido de la siguiente manera:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

Dónde:

NDVI, NDVI_{min} y NDVI_{max} corresponden al valor del mes, el mínimo y máximo valor climatológico. El VCI varía de 0 a 1. Un valor de 0 representa condiciones de estrés (sequía) en la vegetación. Un valor de 1 indica óptimo desarrollo de la vegetación debido a condiciones climáticas favorables. Un VCI de entre 0.4 y 0.6 refleja condiciones intermedias.

2.3.2. Índice de Condición de Temperatura (TCI)

El algoritmo de TCI es similar al VCI; sin embargo, a diferencia del NDVI, altas temperaturas de superficie indican condiciones de sequía debido a un déficit en el contenido de humedad del suelo; y bajas temperaturas indican condiciones húmedas en el suelo (Singh et al., 2003). Por lo tanto, la ecuación del TCI se modifica de la siguiente manera:

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}}$$

Dónde:

LST, LSTmax y LSTmin corresponden al valor del mes, el mínimo y máximo valor climatológico. El TCI varía de 0 a 1, que corresponden a los cambios de temperatura desde extremadamente altas (sequía), hasta condiciones de bajas temperaturas (condiciones húmedas) en el suelo.

2.3.3. Índice de Condición de Precipitación (PCI)

La información del TRMM 3B43 proporciona estimaciones de precipitación mensual. Para esta investigación, el índice de condición de la precipitación (PCI) se normaliza usando un algoritmo similar al del VCI:

Dónde:

TRMM, TRMMmax y TRMMmin corresponden al valor del mes, el mínimo y máximo valor climatológico. El PCI varía de 0 a 1. Un valor de 0 representa condiciones de déficit en las precipitaciones. Un valor de 1 representa condiciones de lluvias intensas.

3. Resultados

3.1. Variabilidad Interanual de los índices

En la Figura 2 se muestra el comportamiento de la variabilidad interanual de las condiciones de

vegetación (Figura 2a), precipitación (Figura 2b) y temperatura superficial (Figura 2c), comprendidos entre los años 2001 a 2014. Los años 2005 y 2010 muestran condiciones de sequía con una clara disminución en la vegetación, en las precipitaciones e incremento en la temperatura respecto a otros años, lo cual es coherente con las condiciones hidroclimáticas reportadas durante esos años (Espinoza et al., 2011).

El gráfico de dispersión (Figura 2d) muestra que no existe una relación entre las anomalías de precipitación y vegetación ($r=-0.15$), ya que la respuesta de la vegetación estaría relacionado principalmente al contenido de agua en el suelo que a las lluvias. Por otro lado, se observa una clara relación entre las anomalías de precipitación y temperatura ($r=-0.57$; Figura 2e); y una relación significativa entre las anomalías de vegetación y temperatura superficial ($r=-0.59$; Figura 2f).

Analizando más profundamente los años 2005 y 2010, las Figuras 3a y 3b muestra el comportamiento de la vegetación y temperatura de superficie durante el 2005 y 2010. En ambos años predominan condiciones secas (valores de NDVI por debajo del primer cuartil, valores de LST por encima del primer cuartil); intensificándose durante los meses de agosto a noviembre. Así mismo se observa una clara disminución en las precipitaciones durante casi todos los meses de los años 2005 y 2010 (Figura 3c).

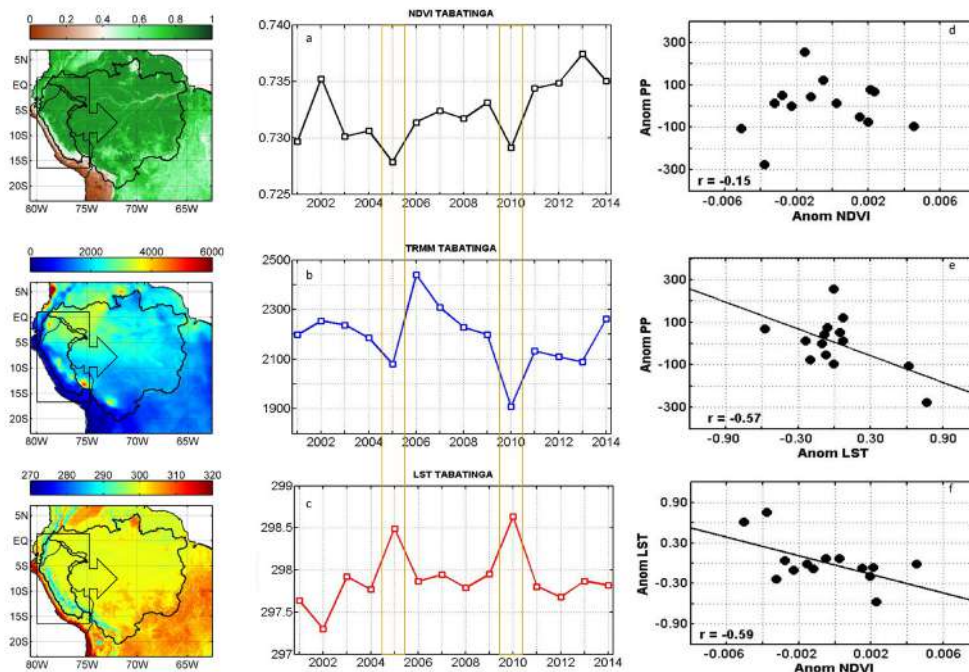


Figura 2. Variabilidad interanual de la vegetación (a), precipitación (b) temperatura de superficie (c). Diagrama de dispersión de anomalías estandarizadas de vegetación, lluvia y temperatura superficial (c, d y e).

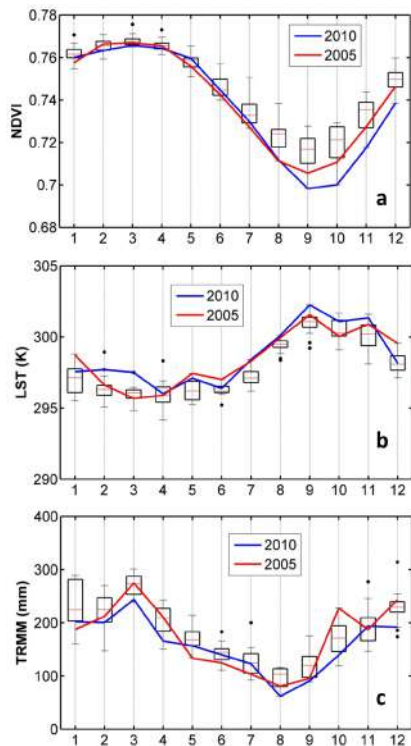


Figura 3. Valores de NDVI y precipitación por debajo primer cuartil durante el 2005 y 2010. Valores de LST por encima del tercer cuartil para los años 2005 y 2010 desde enero (1) a diciembre (12).

3.2. Patrones espaciales a escala de sub-cuencas

Para determinar los patrones espaciales en el área de estudio, se determinaron Índices, que, para los tres casos, toman valores que van desde 0 a 1, dando una clasificación desde condiciones secas hasta condiciones húmedas (ver Tabla 1).

Tabla 1 Categorización de Sequías respecto a los índices de condición de vegetación, temperatura y precipitación

VCI/TCI/PCI	Clase
0.0 - 0.1	Sequía Extrema
0.1 - 0.2	Sequía Severa
0.2 - 0.3	Sequía Moderada
0.3 - 0.4	Sequía Leve
0.4 - 0.6	No Sequía
0.6 - 0.7	Humedad Leve
0.7 - 0.8	Humedad Moderada
0.8 - 0.9	Humedad Severa
0.9 - 1.0	Humedad Extrema

La variabilidad interanual para el Índice de Condición de Precipitación es espacialmente heterogénea respecto al porcentaje de área afectada (Figura 4), pero en la mayoría de sub-cuencas resalta las sequías de los años 2005 y 2010. Así, más del 50% de la superficie de la cuenca analizada presenta condiciones de sequías extremas durante el 2010.

El Índice de Condición de Temperatura (Figura 5) y el Índice de Condición de Vegetación (Figura 6), muestran resultados heterogéneos en cuanto al porcentaje de áreas en condiciones húmedas y condiciones secas. Al igual que el PCI, se observa que la mayoría de sub-cuencas presentaron

condiciones de sequía extrema en un 50% de sus áreas durante los años 2005 y 2010. Sin embargo, existe sub-cuencas en las que no fueron tan notorias las condiciones de sequía.

El TCI y el PCI, muestran comportamientos semejantes en los patrones espaciales para casi todas las cuencas y los diferentes años del área de estudio. Lo que no se muestra respecto al índice de Condición de Vegetación (excepto en los años 2005 y 2010), ya que la respuesta de la vegetación a la variabilidad en las lluvias, no es inmediata y dependerá de periodos largos (meses) con déficits de precipitación.

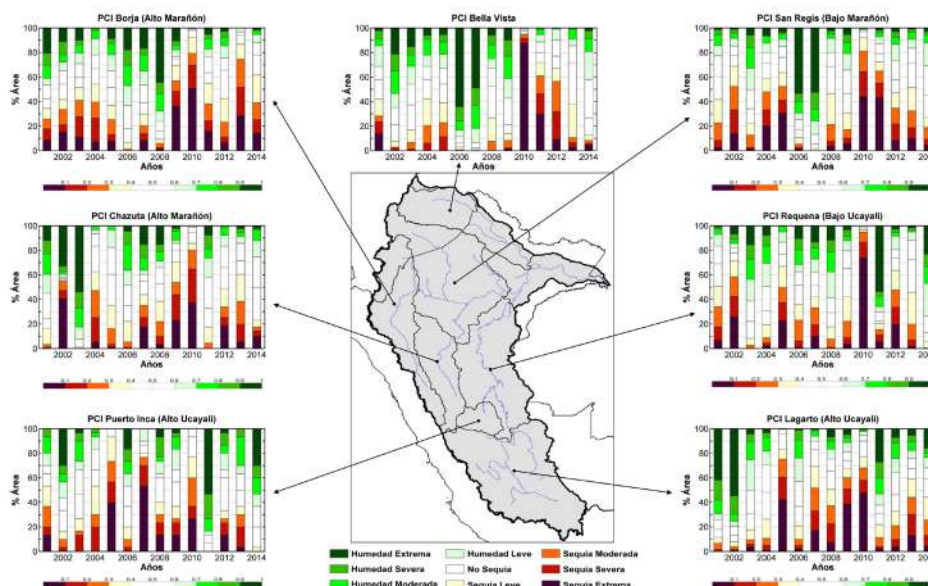


Figura 4. Variaciones interanuales a escala de sub-cuencas del PCI para el periodo 2001-2014 respecto al porcentaje de área en condiciones de sequía y condiciones húmedas.

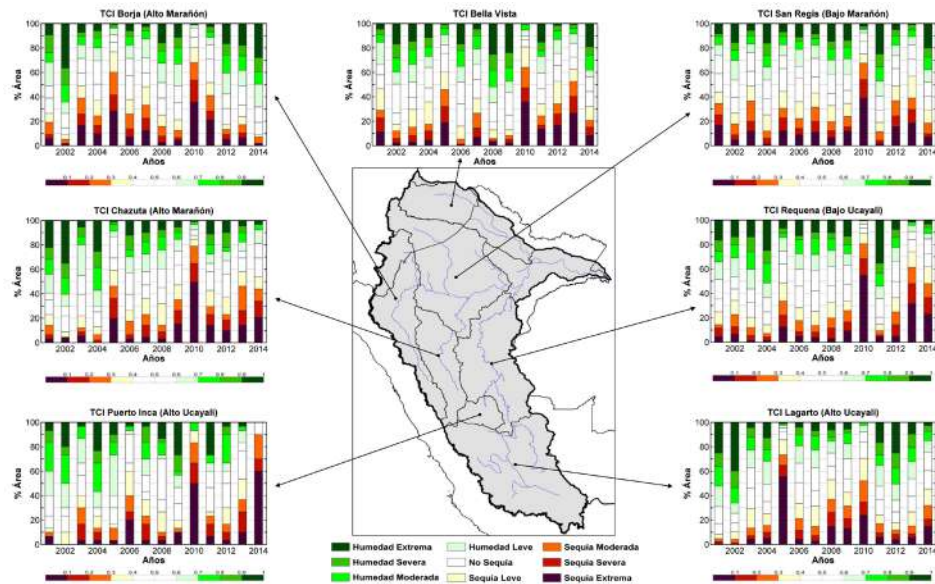


Figura 5. Como la Figura 4 pero para valores de TCI

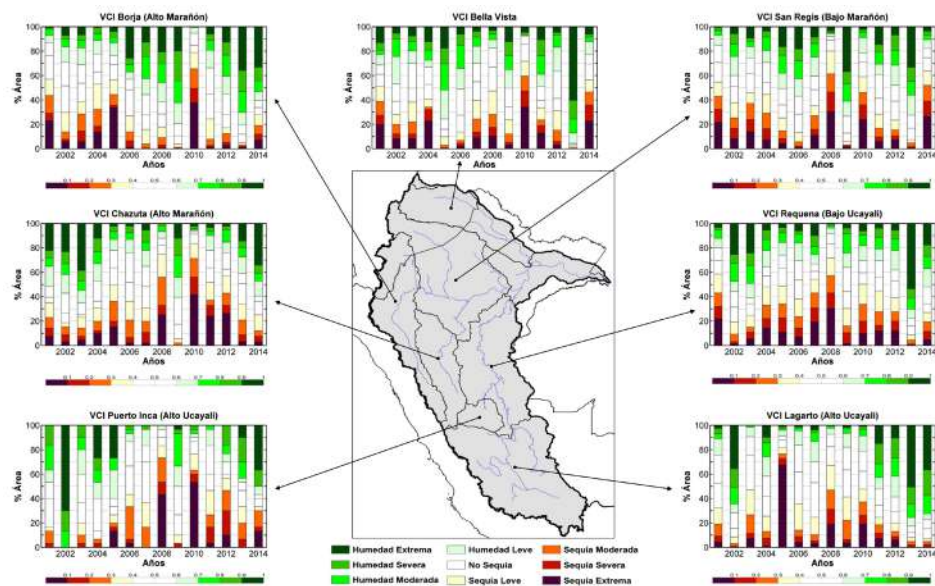


Figura 6. Como la Figura 4 pero para valores de VCI

4. Conclusiones

Los índices desarrollados en este estudio, muestran que los años 2005 y 2010 fueron años de sequías extremas para la cuenca amazónica peruana considerando las condiciones de humedad, temperatura y vegetación.

Los índices se contrastan en gran medida con las sequías ocurridas durante los años 2005 y 2010, con un déficit en las lluvias durante los meses de junio a agosto, aunque la respuesta de la vegetación y temperatura se dieron durante los meses de agosto a noviembre (desfase de 2 a 3 meses).

5. Agradecimientos

Al IGP y al SO-HYBAM por brindarme las facilidades para desarrollar la investigación. Al proyecto N° 397-PNCP-PIAP-2014 (PNCP-IGP-IRD) por el financiamiento y a todos los que me apoyaron durante el inicio y desarrollo de este trabajo.

6. Bibliografía

Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., ... Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344–8. <http://doi.org/10.1038/nature14283>.

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J.L., Cochraneau, G., Filizola, N., Lavado, W., de Oliveira, E., Pombosa, R. & Vauchel, P. (2009a). Spatio-Temporal rainfall variability in the Amazon Basin Countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29:1574–1594.

Espinoza, J.C., Ronchail, J., Guyot, J., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., Drapeau, G. & Pombosa, R. (2011). Climate variability and extreme drought in the upper Solimoes River (Western Amazon Basin): Understanding the exceptional 2010 drought. *Geophysical Research Letters*. 13p

Federal Emergency Management Agency. (1995). *National Mitigation Strategy: Partnerships for Building Safer Communities*. FEMA Mitigation Directorate. 40p.

Huete, A. R., Didan, K., Shimabukuro, Y. E., Ratana, P., Saleska, S. R., Hutya, L. R., & Myneni, R. (2006). Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. *Geophysical Research Letters*, 33(6), L06405. doi:10.1029/2005GL025583.

Huffman, G.J., Adler, R.F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A., Janowiak, J., McNab, A., Rudolf, B. & Schneider, U. (1997). The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78 (1), 5–20.

Lewis, S.L.; Brando, P.M.; Phillips, O.L.; van der Heijden, G.M.F.; Nepstad, D. (2011). The 2010 Amazon drought. *Science*, 331: 554. doi:10.1126/science.1200807.

Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2015). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 1050(July), n/a–n/a. <http://doi.org/10.1002/joc.4420>.

Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *The 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Greenbelt, MD, p. 309–17.

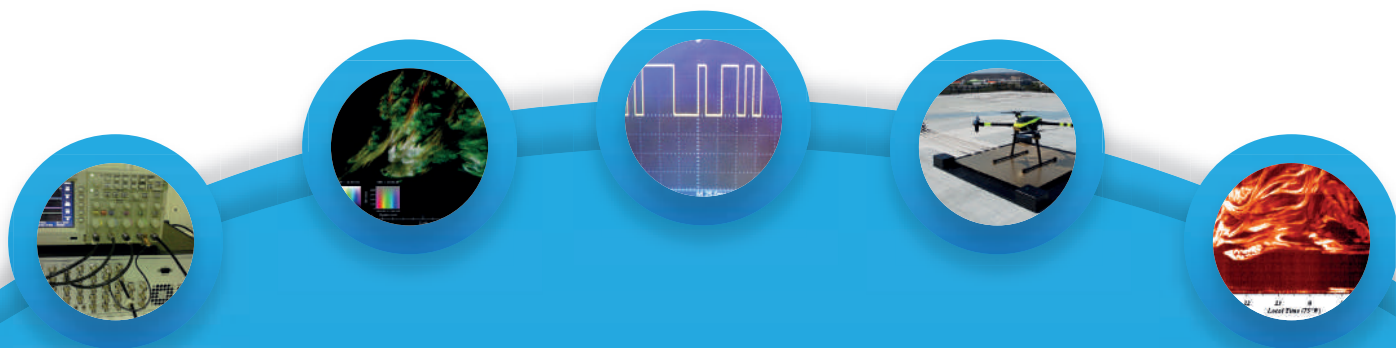
Singh, R.P., Roy, S. & Kogan, F. (2003). Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing* 24 (22), 4393–4402.

Tucker, C.J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation: *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.

Wan, Z. & Z.-L. Li. (1997). A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4):980-996.

Wang, L. & Qu, J.J. (2007). NMDI: a normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysics Research Letters* 34, L20405.

Ciencias de la **Alta Atmósfera**



ADAPTACIÓN Y MODERNIZACIÓN DE DISPOSITIVO DIVISOR DE FRECUENCIA PARA EL NUEVO SISTEMA INTEGRADO DE RADAR DEL RADIO OBSERVATORIO DE JICAMARCA

ADAPTATION AND MODERNIZATION OF FREQUENCY DIVIDER DEVICE FOR THE NEW INTEGRATED SYSTEM RADAR RADIO OBSERVATORY JICAMARCA

Moises Stevend Meza Rodriguez

Universidad Nacional del Callao
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Especialidad de Ingeniería Electrónica
moises.stevend@gmail.com

Asesor: Joaquin Verástegui

Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

En el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ) contamos con un radar el cual para su funcionamiento depende de una señal sincronizada con el controlador de radar, el hardware que generará la señal es un GPS que mandara 1pps.

El actual proyecto tiene como finalidad, desarrollar e implementar este dispositivo capaz de dividir la frecuencia de una señal de reloj externa dependiendo. Para esto se utilizó una tarjeta de desarrollo basado en un SPARTAN 6 de la empresa XILINX el cual tendrá la función ya especificada según ordenes que se le brindara a través del protocolo SPI desde una tarjeta embebida FRDM-K64F basado en el núcleo ARM CORTEX M4 MK64FN1M0VLL12 de FREESCALE, que a su vez recibirá datos por socket a través de Ethernet.

Palabras clave: fpga; spi; divisor.

Abstract

Jicamarca Radio Observatory (JRO) have a radar which to operate depends on a frequency signal synchronized with a radar controller , the hardware that generate the signal it called frequency divider. The hardware will generate the signal is a GPS that will send 1pps.

The current project aims to develop and implement this device capable of dividing the frequency of a clock signal either external depend on their use. For this we will use a development board based on a SPARTAN 6 of the company XILINX, which will have the function specified by orders that would be given right through the SPI protocol from an embedded card FRDM - K64F based on the core ARM CORTEX M4 MK64FN1M0VLL12 of FREESCALE Company, which in turn will receive data through Ethernet socket.

Keywords: fpga; spi; divisor.

1. Introducción

El Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), como ente pionero en la investigación científica en el área de la Radioastronomía, cuenta con radares para poder obtener la información de la Ionosfera a través de medidas de dispersión incoherente. Estos Radares para su funcionamiento cuentan con una electrónica que lo gobierne y controle, por tal motivo en Jicamarca se desarrollo una red integrada de dispositivos electrónicos capaces de poder controlar óptimamente el funcionamiento de nuestro radar. Esta integración se le conoce como Sistema Integrado de Radar, que vendría a ser la interconexión entre diferentes tarjetas embebidas controladas por red a través de un servidor web (en desarrollo) y por medio del protocolo TCP/IP.

Un sistema de radar básico consta de tres dispositivos configurables esenciales, el controlador de radar, el DDS y el sistema de adquisición.

El controlador de radar se encarga de generar señales de sincronismo dependiendo de una señal externa, para lo cual debe ser muy preciso es por esto la importancia de un divisor de frecuencia para cumplir con su tarea óptimamente.

2. Desarrollo

En esta sección se comentará de manera resumida cuales fueron los tópicos de más importancia en el desarrollo del trabajo.

Para la parte del servidor y envío de tramas desde Ethernet, es encargada desde python.

La parte del K64F se trabajo bajo el lenguaje c++ en un entorno de desarrollo online.

La parte del SPARTAN 6 se desarrollo en el ISE XILINX, que es el entorno de desarrollo para programar FPGA'S.

Para pruebas y depuraciones se utilizaron un CPLD Altera EPM240T100C5N (programación en VHDL), Arduino Zero (código en C++) y python.

2.1. Estudio de las bases teóricas

2.1.1. Sistema integrado de radar

El sistema integrado de radar es el conjunto de dispositivos o instrumentos necesarios para operar un radar los cuales se encuentran conectados en red y se comunican por medio del protocolo TCP/IP a un servidor de dispositivos. La finalidad de conectarlos en red es poder ser configurados por una interfaz web (en desarrollo) de manera flexible y sin necesidad de depender de un sistema operativo o de un hardware específico. De esta forma se integra y se centraliza la configuración de experimentos y campañas de los diferentes radares que opera el Radio Observatorio de Jicamarca.

Cabe resaltar que el servidor de dispositivo web seria un cliente respecto a la red de dispositivos, pero también seria un servidor con respecto a la red ROJ.

Un sistema de radar básico consta de tres dispositivos configurables esenciales, el controlador de radar, el DDS y el sistema de adquisición.

Cabe resaltar que el divisor de frecuencia tendrá vital importancia para estudios en campaña, donde se sea modificar la señal de sincronismo a más de 1pps que es la señal externa que llega para su sincronización y viene por parte de un GPS.



Figura 1. Sistema integrado de radar.

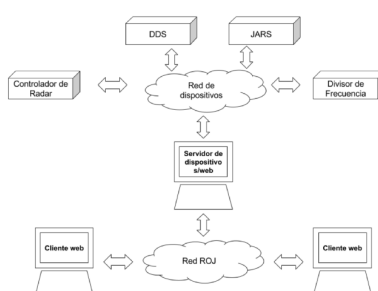


Figura 3. Controlador de radar.



Figura 2. Red de dispositivos de Jicamarca.

2.1.2. Controlador de radar

El controlador de radar se encarga de generar señales de pulsos discretos que funcionan como habilitadores temporales, como señales modulantes, señales de sincronismo, señales de ventana de muestreo entre otras funcionalidades que se le puede dar. Debido a que se encarga de generar señales de sincronismo es necesario que reciba una señal externa de gran exactitud, ya que estos dispositivos funcionan en base a cristales que poseen un error temporal muy grande. Esta señal normalmente viene de un dispositivo GPS, pero no siempre se obtiene la frecuencia deseada de uno de estos equipos, es por esta razón que es necesario dividir esta frecuencia en un número entero de ciclos. Esta es la importancia de tener un equipo divisor de frecuencia que pueda cumplir con esta tarea.

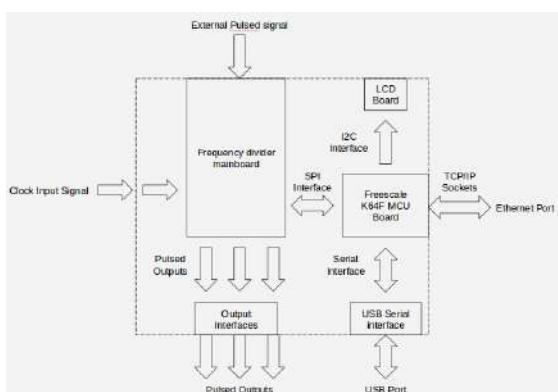


Figura 4. Diagrama del divisor de frecuencia.

2.1.4. Trama de información del MBED:

Tabla 1. Trama de información.

5B	4B	1B	1B	2B	NB	1B
CAB	LEN	ID_CLASS	ID_DEV	CMD	PAYLOAD	XOR

DESCRIPCIÓN:

CAB: Identifica el inicio de la trama.

LEN: longitud de PAYLOAD.

ID_CLASS: Identifica la clase de dispositivo a programar.

ID	DISPOSITIVO
1	CR
2	DDS
3	JARS
4	USRP
5	ECHOTEK
6	ABS
7	CLK_GEN

2.1.3. circuito divisor de frecuencia

El Divisor de Frecuencia consiste en un módulo capaz de sincronizarse con una señal externa y poder variar su frecuencia en números enteros según comandos recibidos a través de SPI y enviados desde el K64F. El presente proyecto se desarrolló básicamente en torno al Mainboard del dispositivo divisor de frecuencia y el microcontrolador K64F.

El proyecto se centro en el código de vhdl, para esto se implemento procesos en los cuales se decepcionará los datos por spi, sincronizara una señal externa y dependiendo de un bloque de control transmutara según el preescalado la señal de reloj.

2.1.5. Hardware Utilizado

K64F: La board de desarrollo FRDM-K64F es una plataforma de desarrollo de muy bajo costo para Kinetis K64, K63 y K24. El hardware de la FRDM-K64F es compatible con la disposición de pines de Arduino™ R3, proporcionando una amplia gama de opciones de expansión.

SPARTAN 6: La familia FPGA Spartan-6 de Xilinx ofrece un equilibrio óptimo de bajo riesgo, bajo costo, bajo consumo y rendimiento para aplicaciones sensibles al costo. Estos FPGA utilizan una tecnología de proceso de 45 nm de bajo consumo comprobado. Además, la serie Spartan-6 ofrece una tecnología de gestión avanzada de energía, hasta a 150 k de celdas lógicas, bloques integrados PCI Express, soporte de memoria avanzada, partes DSP de 250 MHz y transceptores de baja potencia de 3.2 Gbps.



Figura 5. SPARTAN 6

Para el presente proyecto se diseño una tarjeta en el software Eagle pero no se pudo pasar a físico por falta de tiempo. Es por este motivo que se trabajo con la tarjeta del controlador de radar.

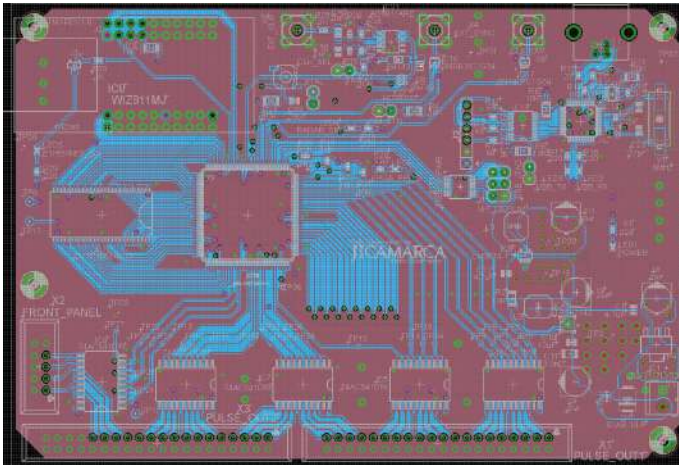


Figura 6. Tarjeta del divisor de frecuencia.

2.1.6. Comunicación

SPI: Para poder recibir los datos en sí, hay que conocer como funciona el protocolo SPI. La comunicación empieza cuando el maestro pone a '0' el pin CS que previamente estaba en '1', con esto seleccionamos el esclavo especificado para comunicarse. Ahora una vez que CS este en '0' vamos a detectar cada flanco de subida obtenida por el pin SCK, ya que esta será nuestro reloj de sincronización establecida por el maestro. Contamos cuantos flancos de subida obtenemos del SCK, como este protocolo transmite en byte entonces podemos hacer una cuenta de 8 flancos de subida del SCK, y con esto saber si llego un dato desde la red.

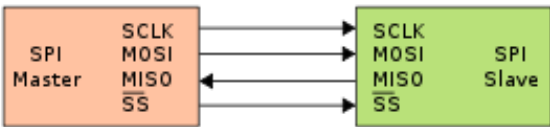


Figura 7. Protocolo SPI

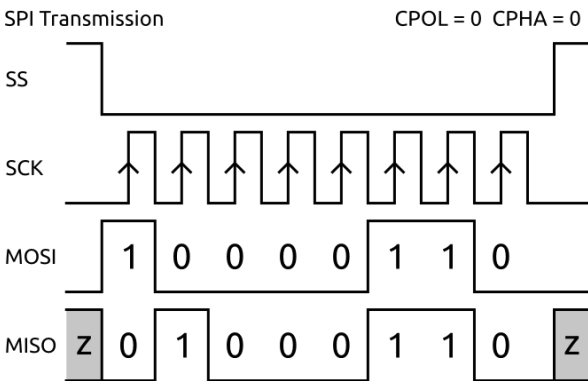


Figura 8. Ondas del SPI.

TCP/IP: Es un conjunto de protocolos en referencia a los dos protocolos más importantes que la componen, que fueron de los primeros en definirse, y que son los dos más utilizados de la familia. Estos protocolos permiten el envío de información a través de las computadoras en red. Y asu ves se pueden conectar a una red local como a internet.



Figura 9. Sistema en red.

2.2. Programación del FPGA

2.2.1 Bloques constituyentes del FPGA

SPI: Este bloque se encargara de recepcionar la data de 8 bits transmitida desde el módulo K64F.
SINC: Esta etapa se encargara de recepcionar el clock externo y sincronizarlo con el clock interno.
B2W: se encargara de tratar la data del spi y entregarlo al registro de control.
IV: Se encargara de dividir la señal desde el registro de Control.

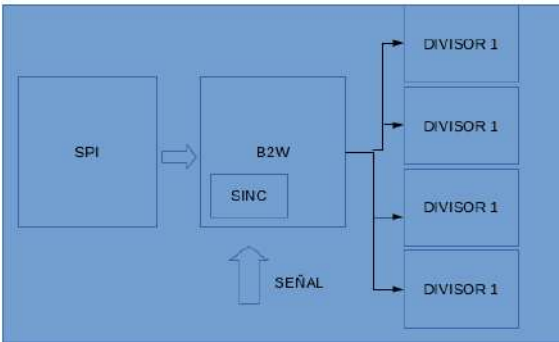


Figura 10. Diagrama de bloques del spartan 6.

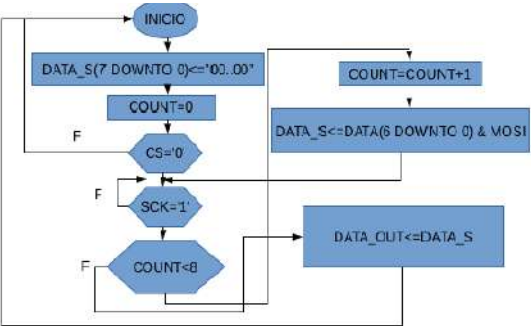


Figura 11. Diagrama para la recepción del SPI.

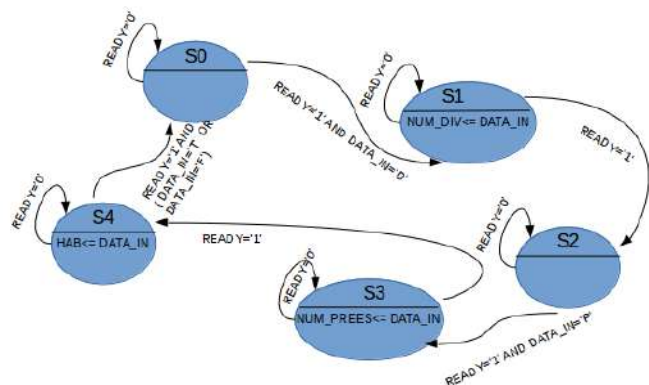


Figura 12. Máquina de estados para el tratamiento de la trama.

2.3. Modificaciones al MBED

Se utilizó un código de envío de tramas que consistía en mandar caracteres que configuren la habilitación, el preescalado, etc.

Se implementó un código que permitía enviar la trama antes expuesta que luego será decodificada por el mbed. Toda esta trama se programó en python ya que actualmente el servidor web está en desarrollo.

3. Resultados

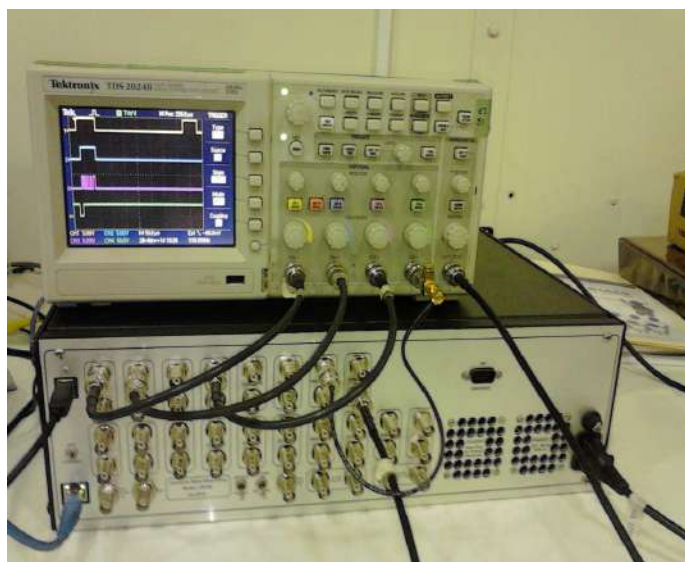


Figura 13. recepción de la señal enviada.

- La recepción del SPI se logró satisfactoriamente.
- El envío de la trama por tcp/ip (socket) se recibió correctamente.

4. Conclusiones y Recomendaciones

Se implementó correctamente los bloques en el FPGA, recibiendo los datos por SPI fielmente.

Se podría trabajar con preescaladores de más de 10 bits lo cual implicaría un aumento en el preescalador, para esto solo se debería modificar el contenido del bloque B2W.vhd.

5. Agradecimientos

Agradezco al IGP y al Radio Observatorio de Jicamarca por haberme dado la oportunidad de realizar mis primeras prácticas pre profesionales, e iniciarme en la investigación científica.

Al mi asesor Joaquín Verastegui por la paciencia, atención y ayuda brindada en el transcurso del proyecto.

6. Bibliografía

Mbed Developer. HandBook. <https://developer.mbed.org/handbook/Homepage>

Xilinx Product. <http://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/spartan-6.html>

CALIBRACIÓN DE IMÁGENES DE RADAR PARA MONITOREO DE LA F_DISPERSA

RADAR IMAGING CALIBRATION FOR MONITORING THE EQUATORIAL SPREAD-F

Mariano Uria Valencia

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ciencias
marianouriavalencia@gmail.com

Asesor: Ing. Miguel Urco

Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

En el presente informe se muestran los resultados y el trabajo realizado durante este período de prácticas pre profesionales. Se realizó un manual de uso completo del programa Imaging conteniendo la instalación del software, un test de instalación, como calibrar los datos, procesamiento de la data y un pequeño apéndice conteniendo errores frecuentes.

Lo siguiente fue encontrar un algoritmo de calibración para hallar las fases de las antenas en las cuales “señalen” a un mismo punto, partiendo de los datos, y volver el proceso automático; lo que se logró en este ámbito fue implementar algoritmos que sirven como índice para saber valores críticos de dispersión en el eje “x”, la esperanza matemática de la imagen y el número de picos en una imagen, lo cual nos da una idea de donde se encuentra la potencia máxima de la señal.

Luego de implementar los algoritmos antes mencionados, estos son puestos a prueba en los días de campaña del 2009, verificando así cierto grado de confianza.

Palabras clave: calibración, algoritmo, dispersión, esperanza matemática.

Abstract

In this report we present the results and the work during this period of pre professional practices. We performed a manual full use of the module Imaging containing Imaging software installation, a test installation as calibration data, data processing and a small appendix containing frequent errors.

The next was to find a calibration algorithm to find the phases of the antennas which “indicate” to the same point, from the data, and return the automatic process; what was achieved in this area was to implement algorithms that serve as an index to know critical values of dispersion in the axis “x”, the mathematical expectation of the image and the number peaks in an image, which gives us an idea of where the maximum power is the signal.

After implementing the above algorithms, these are tested in the day campaign of 2009, verifying certain degree of confidence.

Keywords: calibration, algorithm, dispersion, mathematical expectation.

1. Introducción

En el radiobservatorio de Jicamarca se hacen estudios de la alta atmosfera implementando para ello varios módulos que se encargan de procesar diferentes tipos de data dependiendo de la antena y el experimento que se realice, para el caso de esta publicación el experimento es llamado Imaging, con este experimento se trata de obtener una representación de la ionosfera utilizando el efecto doppler y varias antenas para determinar la velocidad y ubicación de las cargas presentes en la ionosfera para al final obtener imágenes RTI (Range Time doppler Intensity).

Para obtener una imagen de la ionosfera, hace falta que las antenas estén calibradas para apuntar a un mismo lugar, al iniciar el proyecto se contaba con una forma de calibración la cual tenía como guía a la fase en la cual la potencia de la imagen se hacía máxima, el algoritmo no era del todo seguro pues había punto que señalaban máximos en lugares donde la solución no convergía y esto llevaba a errores al momento de la calibración, es por ello que en el presente trabajo se desarrollo un índice para localizar la verdadera posición de la potencia máxima; es así que se desarrolla un algoritmo que toma a la potencia como una probabilidad que se encuentre en esa fase y se logra un acercamiento al máximo verdadero, una vez hecho esto se nota que la posición de la calibración no se encuentra necesariamente en la posición de la potencia máxima así que se desarrollan otros algoritmos para la calibración que al final terminan siendo tratados como índices. Finalmente se muestra un cuadro de la cercanía de estos algoritmos con la fase correcta en un día que ha sido calibrado con los índices antes mencionados.

2. Marco teórico

2.1. Física de la ionosfera y las anomalías de la capa F (F spread)

La ionosfera es la región de la atmosfera donde la concentración de electrones es lo suficientemente alta como para tener un efecto significativo en la propagación de ondas de radio y es determinado por sus propiedades y efectos de propagación de las ondas de radio. Se trata de un magnetoplasma, esto es, un gas de baja densidad cuyos constituyentes presentan carga individual aunque, en conjunto, es eléctricamente neutro, y que se encuentra en un campo magnético. Mientras su frontera inferior se sitúa a unos 50 ó 60km de altura sobre la superficie terrestre, la superior no está bien definida y continua hasta traslaparse con la exosfera y finalmente fundirse con la plasmosfera. La razón por la cual las

ondas de radio son reflejadas por la ionosfera tiene que ver con las oscilaciones propias del plasma, dicha frecuencia de oscilación está dada por:

$$\omega_n^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m}$$

Donde N es la concentración (partículas por unidad de volumen) de electrones, los demás son la carga del electrón y su masa además de la constante de permitividad eléctrica en el vacío. Dicha frecuencia depende exclusivamente de la densidad electrónica; a una mayor densidad electrónica le corresponde una frecuencia más alta.

Así también los fenómenos de inestabilidades del plasma, que ocurren en la región F, están agrupados bajo el nombre genérico de Spread F. Esto fue derivado de las primeras observaciones, ya que en algunas ocasiones el eco reflejado no presentaba un buen comportamiento, sino que se expandía (spread) en altura o frecuencia. El fenómeno ocurría normalmente en la noche, aunque esporádicamente durante horas del día.

Debido a los comportamientos anómalos que presenta la capa F y sus periodos de inestabilidad, los cuales no concuerdan con la teoría, es que se monitorea para así conocer su comportamiento y entender el porqué difiere de la teoría, para ello se usa el método de dispersión coherente con lo cual se puede captar las formaciones nocturnas ya mencionadas, ya que al enviar una señal de baja potencia solo las formaciones que se encuentren bien definidas podrán enviar una señal de retorno que sea constructiva y posea la suficiente potencia para ser percibida por los receptores.

2.2. Módulo Imaging

Al tratar de estudiar lo que se denomina spread F es que se crea el módulo Imaging, el cual trabaja con 8 canales del radar de Jicamarca, ver figura 2.1. Debido a que el radar no puede ser movido, la forma en la que puede “señalar” a algún lugar es cambiando las fases de los canales y así lograr apuntar a una dirección pero para poder hacer esto, es necesario que todos los canales estén inicialmente señalando a una misma dirección; para alinear o calibrar nuestras antenas como referencia se toma a una estrella, que emite ondas de radio, llamada hydra.

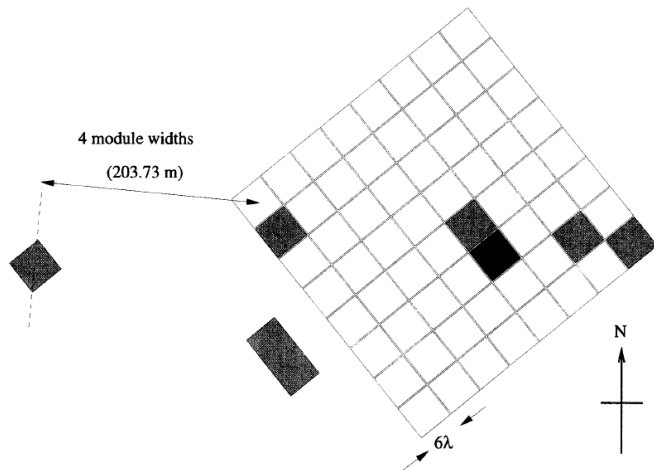


Figura 2.1 Geometría de la antena

Debido a los comportamientos anómalos que presenta la capa F y sus periodos de inestabilidad, los cuales no concuerdan con la teoría, es que se monitorea para así conocer su comportamiento y entender el porqué difiere de la teoría, para ello se usa el método de dispersión coherente con lo cual se puede captar las formaciones nocturnas ya mencionadas, ya que al enviar una señal de baja potencia solo las formaciones que se encuentren bien definidas podrán enviar una señal de retorno que sea constructiva y posea la suficiente potencia para ser percibida por los receptores.

link en red de Jicamarca <http://10.10.50.96/projects/imaging/wiki>

3.3. Algoritmo de distribución de probabilidad en muestra finita



Figura 3.1 Guía del módulo Imaging

Debido a que tomamos la potencia de las fases como una representación de la probabilidad que la gráfica este calibrada y al tener que nuestra distribución no es como una distribución gaussiana que inicia en el origen sino que es periódica, es que se hará una corrección simple al método usado para hallar el máximo como una aproximación de la esperanza matemática de dicha distribución, para ello tomaremos una función periódica a la cual se le dará límites comenzando desde su mínimo para luego trasladarlo, si es que es necesario, a un valor dentro de los límites de las fases.

```
int Ccalibration::getPhaseIndex(){
    int index_min, index_max, index;
    float norm_power[this->power_len], norm_dev[this->power_len], norm_plco[this->power_len];
    float suma=0.0, esperanza=0.0, pruebad=0.0;
    float delta2_power[this->power_len], delta_power[this->power_len];
    const int factor = 10;

    index_min = getMinIndex(this->powerList, this->power_len);
    index_max = getMaxIndex(this->powerList, this->power_len);

    for (int i=0; i<this->power_len; i++){
        norm_power[i] = (this->powerList[i] - this->powerList[index_min])/(this->powerList[index_max] - this->powerList[index_min]);
    }

    otro[0]=100*(norm_power[0]-norm_power[power_len-1])*(-norm_power[0]+norm_power[1]);
    otro[this->power_len-1]=100*(-norm_power[this->power_len-1]+norm_power[0])*(norm_power[this->power_len-1]-norm_power[0]);

    for (int i=1; i<this->power_len-1; i++){
        otro[i] = 100*(norm_power[i]-norm_power[i-1])*(-norm_power[i]+norm_power[i+1]);
    }

    if (this->nChannels < 3)
        index = index_min;
    else
        index = index_max;

    for (int i=0; i<this->power_len; i++){
        esperanza+=i*norm_power[i];
        suma+=norm_power[i];
    }

    for (int i=0; i<index_min; i++){
        esperanza+=this->power_len*norm_power[i];
    }

    }

    esperanza=esperanza/suma;

    if (esperanza > this->power_len)
        esperanza = esperanza - this->power_len;
```

Figura 3.2 Programa de distribución de probabilidad en muestra finita

En este algoritmo inicialmente la variable “esperanza” representa a la sumatoria primeramente de 0 a p y luego se le añade la segunda sumatoria que se multiplica por el valor extremo así al final se divide por la variable “suma” que contiene la suma acumulada de todos los valores de la función en el intervalo 0 a p; al final se considera si el valor final pertenece de 0 a p, sino entonces se le resta un periodo, lo cual no afecta al algoritmo por ser una función periódica.

3.4. Algoritmo de dispersión focalizado

En este algoritmo lo que se realiza es cuantificar el grado de dispersión de los puntos de la imagen y la cantidad de puntos, debido a que los puntos a calibrar no están necesariamente en el centro del eje X y el eje Y es que se debe tomar sólo la dispersión en una dimensión, por ello es que en este trabajo se tomo a calibrar en el eje X (nivel de referencia) y se toman cotas para no repetir la imagen. Esto se ve representado en la figura 2.4 con la función __getDesv implementada en el método de calibración del programa Imaging, siguiendo el paradigma de Programación Orientada a Objetos.

```

float Ccalibration::getDesv(float **image, int nx1, int ny1) {
// TODO Auto-generated constructor stub
int npeaks=0;
float desv=0,cm=0.0;
float intensity[nx][ny], intensity_k;

// if (!this->initialized)
// return minVal;

//nx = nFFT * nhels
//ny = nx_cuts * ny_cuts

for(int k=0;k<nhels;k++){
intensity_k = 0;
for(int l=0;l<nx;l++){
for(int j=0;j<ny;j++){
intensity[l][j] = 0;
for(int i=0;i<nffts;i++){
if(image[k*nffts+l][j*nx+l]==99)
intensity[l][j] += image[k*nffts+l][j*nx+l];
else
intensity[l][j] += -20;
}
intensity[l][j] /= nffts;
intensity_k += intensity[l][j];
}
}

intensity_k = intensity_k/(nx*ny);

// Desviacion, se considera un dcosx=0.2 y dcosy=0.1
for(int j=0;j<ny;j++){
for(int l=0;l<3*nx/4;l++){
if(intensity[l][j] > intensity_k){
desv += (float(l)-float(nx-1)/2)*(float(l)-float(nx-1)/2);
}
}
}

return desv;
}

```

Figura 3.3. Programa de dispersión focalizado

3.5. Algoritmo para obtener el número de picos en una imagen

Este algoritmo se basa en las intensidades y como al superponerse los puntos de la imagen única que debería haber se encuentre en un valor mínimo de picos; para encontrar el número de picos primeramente se hallan las intensidades media en cada altura después se hace un mapeo por toda la imagen hasta que se verifiquen puntos en los cuales la intensidad se 1.5 veces la media, de cumplirse ello se pasa a tomar un promedio con los puntos cercanos a este y se comprueba que sea mayor que la media para luego determinar que el punto en evaluación es un pico.

```

float Ccalibration::getPicos(float **image){
int pico=0;
float intensity[nx][ny],intensity_k;

for(int k=0;k<nhels;k++){
intensity_k = 0;
for(int l=0;l<nx;l++){
for(int j=0;j<ny;j++){
intensity[l][j] = 0;
for(int i=0;i<nffts;i++){
if(image[k*nffts+l][j*nx+l]==99)
intensity[l][j] += image[k*nffts+l][j*nx+l];
else
intensity[l][j] += -20;
}
intensity[l][j] /= nffts;
intensity_k += intensity[l][j];
}
}

intensity_k = intensity_k/(nx*ny);

for(int j=0;j<ny;j++){
for(int l=0;l<nx;l++){
float comp;
if(intensity[l][j]>1.5*intensity_k){
comp=intensity[l][j]+intensity[l-1][j]+intensity[l+1][j]+intensity[l][j-1]+intensity[l][j+1];
comp=comp/5;
if(comp>intensity_k) pico++;
}
}
}

return float(pico);
}

```

Figura 3.4. Algoritmo para obtener el número de picos en una imagen

Una vez realizado este desarrollo lo que se realizó fue la prueba de calibración para un día del año 2009, para este trabajo se realizaron las pruebas en el día 4 noviembre.

4. Resultados

No se pudo hallar un algoritmo que sea absoluto por el cual se calcule la fase sin interferencia de una persona debido a la presencia de picos en la señal (puntos que no llegan a converger), por lo cual se toman a los algoritmos antes impuestos como índices en los cuales se hallan valores críticos de dispersión y potencia máxima para luego tomarlos como guía y mediante la participación humana calibrar las señales de llegada. A continuación se presentarán algunos resultados de los algoritmos antes mencionados en el día 4 de noviembre del 2009 a horas 19:30 entre las alturas 300-400m

4.1. Algoritmo de distribución de probabilidad en muestra finita

Para poder realizar los cálculos se toma a la grafica de potencia como referencia y se normaliza en el algoritmo para poder trabajar como una distribución de probabilidad y se sigue el procedimiento de calibración de la sección 3.1.

- Al calibrar el canal 2

Realizamos una gráfica potencia normalizada vs pasos de la fase, aquí se toman 64 puntos pues no es necesario ser más específico para observar su comportamiento.

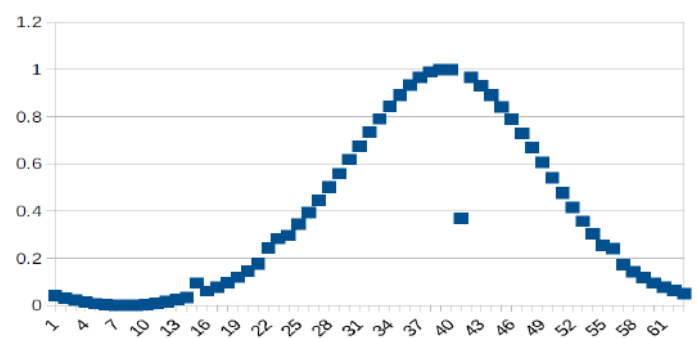


Figura 4.1 Fase vs potencia canal dos

La esperanza matemática resultante es 38.12, la cual esta coincidiendo con el resultado que se buscaba, el cual era obtener el lugar del máximo que se encuentra en 40.

- Al calibrar el canal 1

Realizamos una gráfica potencia normalizada vs pasos de la fase se tuvo que usar 627 puntos para poder observar su comportamiento.

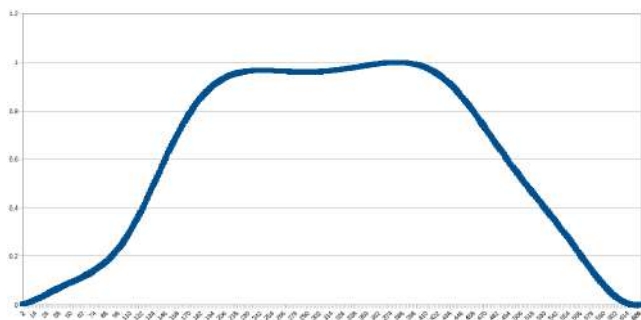


Figura 4.2. Fase vs potencia canal uno

La esperanza matemática resultante es 320.25, la cual se acerca con el resultado que se buscaba, el cual era obtener el lugar del máximo que se encuentra en 398

- Al calibrar el canal 3

Realizamos una gráfica potencia normalizada vs pasos de la fase, se tuvo que usar 628 puntos para ver su comportamiento.

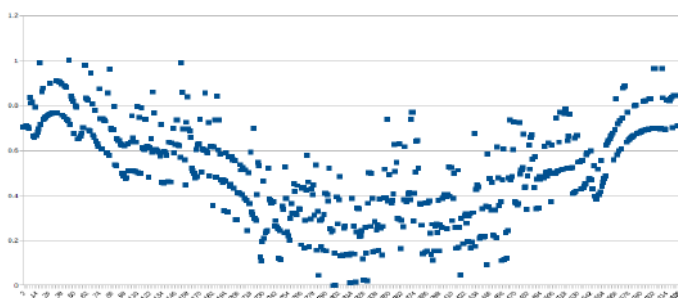


Figura 4.3. Fase vs potencia canal tres

La esperanza matemática resultante es 0.67, la cual se acerca con el resultado que se buscaba, el cual era obtener el lugar del máximo que se encuentra en 27.

- Al calibrar el canal 4

Realizamos una gráfica potencia normalizada vs pasos de la fase, donde se tuvo que usar 627 puntos para ver su comportamiento.

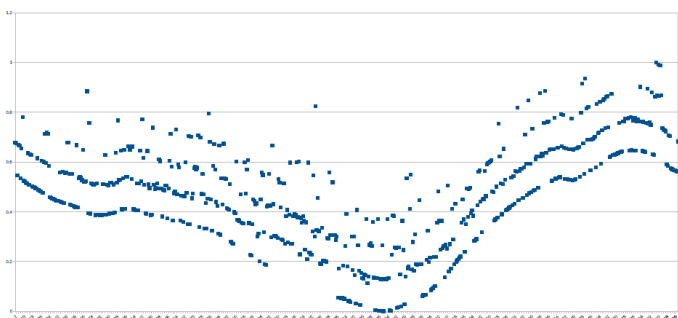


Figura 4.4. Fase vs potencia canal cuatro

La esperanza matemática resultante es 21.22, la cual se acerca con el resultado que se buscaba, el cual era obtener el lugar del máximo que se encuentra en 602.

- Al calibrar el canal 5

Realizamos una gráfica potencia normalizada vs pasos de la fase con 627 puntos.

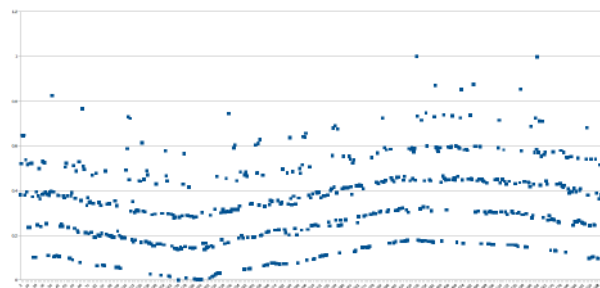


Figura 4.5. Fase vs potencia canal cinco

La esperanza matemática resultante es 486.89, la cual se acerca con el resultado que se buscaba, el cual era obtener el lugar del máximo que se encuentra en 458.

- Al calibrar el canal 6

Realizamos una gráfica potencia normalizada vs pasos de la fase con 627 puntos.

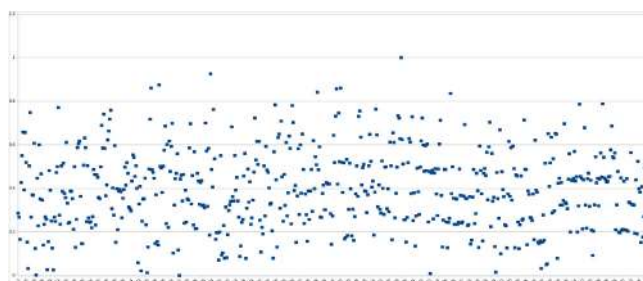


Figura 4.6. Fase vs potencia canal seis

La esperanza matemática resultante es 471.55, de la gráfica se puede reconocer el que existe una formación en el punto 346, lo cual se puede atribuir a la señal obtenida de interferir los 6 canales.

4.2 Vista general

Ahora comparamos los resultados obtenidos con los índices antes mencionados

Canal a calibrar	Índices	Fase esperada	Fase Potencia		Fase dispersión		Fase Picos		Fase Esperanza
			max	min	max	min	max	min	
2		2.57	0.49	-2.51	0.79	-2.41	1.19	3.17	0.622
1		2.08	-1.7	2.1	-2.6	-1.2	2.78	-1.7	-1.31
3		2.28	2.38	-1.4	1	-2.4	1.8	-1.9	2.094
4		0.53	0.35	-2.45	-1.25	3.13	0.73	3.13	0.42
5		-0.99	2.41	1.41	0.71	0.21	2.61	0.21	-1.688
6		1.23	-1.45	2.53	0.45	-2.45	1.26	-2.45	-0.709
7		0.85	-0.53	-2.03	0.85	0.27	0.85	1.55	1.033

Figura 4.6. Fase vs potencia canal seis

En el tabla 4.1 se muestra cuán acertados son los resultados de los algoritmos y se resaltan los datos más cercanos a la fase real, obteniendo así que los algoritmos más confiables son los de distribución de probabilidad (Esperanza), potencia y número de picos

4.3. Calibración del día 4 noviembre del 2009 (d2009308)

Partiendo de iniciar las fases de hydra a cero, se comenzó la calibración del día d2009308 calibrándose primeramente los canales 0 y 2 por ser los más cercanos y centrándolos usando el índice de mínima potencia, llegando así a lo siguiente:

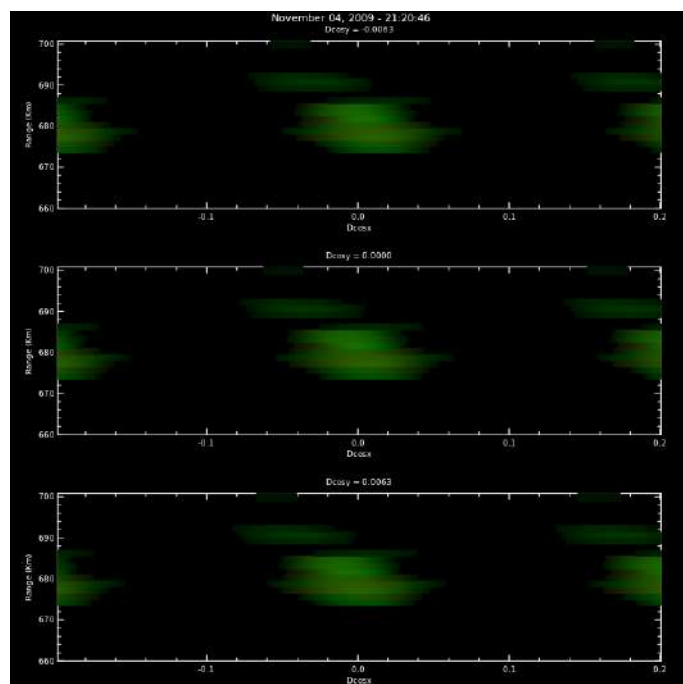


Figura 4.7. Calibración del canal de referencia

Una vez centrada la imagen, habrá que variar las fases de los demás canales hasta que la interferencia sea constructiva; en donde la interferencia es constructiva hasta llegar a un clímax y a partir de ese momento comienza a decaer hasta la desaparición de la imagen.

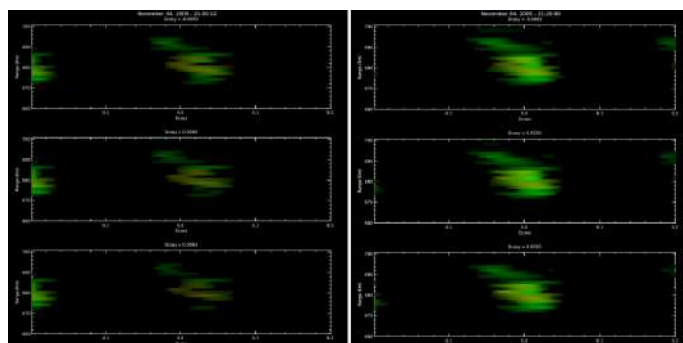


Figura 4.8. Proceso de calibración

En este procedimiento hace falta la supervisión humana para declarar cual es el punto de calibración tomando en cuenta los puntos críticos que nos brindan los índices, para mayor información ir al servidor del radiobservatorio y ver http://10.10.50.96/projects/imaging/wiki/Calibracion_.

Realizando este mismo procedimiento con los siguientes canales, se obtienen las nuevas fases para las cuales los canales están calibrados y con las cuales se procesara la data, esto es:

hydra = 0.00, 2.08, 2.57, 2.28, 0.53, 5.29, 1.23, 0.85
Con estas fases se llega a la siguiente imagen procesada del día d2009308 desde las 19:00 hasta las 22:48

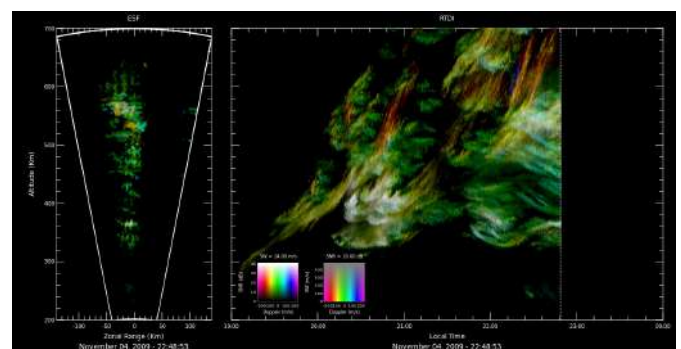


Figura 4.9. Resultado con las fases calibradas

5. Conclusiones

- Se realizó un manual de funcionamiento del programa Imaging
- El algoritmo de distribución de probabilidad resulta ser un buen acercamiento a la mayoría de casos para hallar el verdadero valor máximo de la potencia
- Se implementaron los algoritmos de número de picos, de distribución de probabilidad para hallar la esperanza matemática y de dispersión focalizada, resultando ser índices para la calibración, pero no ser absolutos.

6. Bibliografía

- D.L. Hysell, 1999, *Imaging coherent backscatter radar studies of equatorial spread F*
- D. L. Hysell, R. F. Woodman, 1997, *Imaging coherent backscatter radar observations of topside equatorial spread F*
- E. C. Cipagauta, 2007, *Dinámica de la ionosfera de latitudes bajas*

CODIFICACIÓN DE SEÑAL DE RADIO BEACON PARA CUBESAT

RADIO BEACON SIGNAL ENCODING FOR A CUBESAT

Juan Manuel Llanos Miranda

Universidad de Ingeniería y Tecnología

Facultad de Ingeniería Electrónica

juan.llanos@utec.edu.pe

Asesor: Edgardo Pacheco, Ph. D.

Radio Observatorio de Jicamarca

IGP

Resumen

El presente informe muestra el desarrollo de un proyecto que consiste en la codificación de la señal de radio Beacon utilizando modulación de fase binaria que se empleará a bordo de un CubeSat. En primer lugar, se seleccionó el microcontrolador que funcionará correctamente durante el tiempo de vida útil del satélite. Luego, se procedió a realizar simulación e implementación de la codificación, para la cual se tomó como base el protocolo de comunicación de las señales de GPS. Adicionalmente, se realizaron las simulaciones de la modulación y demodulación de la señal transmitida.

Palabras clave: cubeSat, microcontrolador, GPS

Abstract

The present report shows the development of a project that involves the encoding of radio beacon signals using binary phase modulation. This instrument will be used onboard a CubeSat. First, we selected a microcontroller that will have the capability to work correctly during the lifetime of the satellite. Then, we performed the simulation and implementation of the coded signal based on the GPS protocol codes for communication. Furthermore, the modulation and demodulation processes of the transmitted signal were simulated.

Keywords: cubeSat, microcontroller, GPS

En [1] se define que un CubeSat de una unidad es un satélite que tiene la forma de un cubo de 10x10x10cm y una masa que no excede 1 kilogramo. Este tipo de satélites son de bajo costo. Por ello, el Radio Observatorio de Jicamarca ha decidido desarrollar un proyecto de instrumentación para CubeSats. Con el propósito de medir la cantidad de electrones presentes en la zona de la ionósfera que se encuentra sobre el radio observatorio. Se planea que orbite sobre el ecuador a una altitud comprendida entre los 600 y 1000 km durante un año. Se desea codificar la señal emitida por el satélite debido a que permitirá obtener una mayor ganancia de la misma cuando sea decodificada.

La señal codificada será transmitida del satélite utilizando el método de modulación de fase binario, que consiste transmitir la señal en fase cuando se desee enviar un 0 lógico y desfasarla 180 grados cuando se desee enviar un 1 lógico. Para realizar la modulación es necesario generar una señal de control utilizando un microcontrolador. Debido a que el dispositivo será utilizado en el espacio se consideró los efectos de la radiación en los dispositivos electrónicos.

En la Figura 1 se muestra el diagrama general del sistema de transmisión que será utilizado en el CubeSat, el Main Board envía os datos al microcontrolador el cual emite la señal de control del multiplexor que permite la salida de la señal en fase o desfasada.

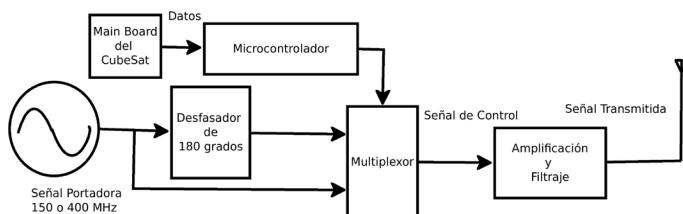


Figura 1. Diagrama de Bloques del sistema de transmisión.

2. Desarrollo

2.1. Selección del Microcontrolador

La primera parte del desarrollo del proyecto era definir el tipo de microcontrolador a utilizar. En un principio se propuso usar uno especialmente diseñado para tolerar altos niveles de radiación; sin embargo, su difícil obtención hizo que se reconsideraran otras opciones.

Después, se determinó la cantidad de radiación absorbida anualmente a la altitud planeada para el experimento utilizando los estudios realizados en [2]. Cuyo valor máximo es de 1krads, el cual se muestra figura 2. En [3] se prueba que un microcontrolador

Atmega de uso comercial tolera 5 krads de radiación antes de comenzar a fallar. Por lo cual el tiempo de vida útil del dispositivo sería cinco veces el tiempo deseado de funcionamiento del CubeSat.

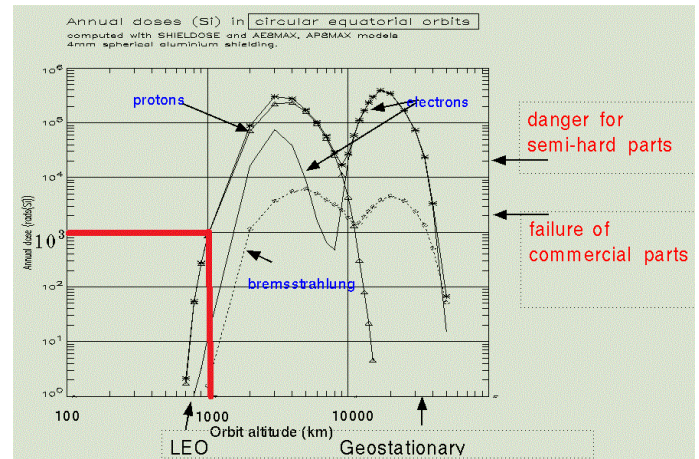


Figura 2. Cantidad de radiación absorbida anualmente en función de la altura de una esfera de aluminio de 4mm de diámetro que tiene una órbita ecuatorial., imagen tomada de [2].

2.2. Codificación de la señal

La codificación se basó en la utilizada por los GPS, la cual consiste en generar primero una secuencia pseudo aleatoria. Luego a cada bit de los datos se aplica la operación lógica XOR con la secuencia pseudo aleatoria generada; es decir, si la secuencia tiene un periodo de 15 bits y la data 8 bits, los 15 bits de la secuencia se combinarían con cada uno de los 8 bits de datos dando como resultado la codificación que al final tendría un total de 120 bits.

El diagrama de flujo mostrado en la figura 3 muestra que el programa principal fue subdividido en tres funciones. En primer lugar, se usa la función que lee la data enviada por el MainBoard. En segundo lugar, se genera 1 chirp de la secuencia pseudo aleatoria. Esta función se encargará de generar los chirps [4], un chirp es el nombre que se le da a un bit de secuencia pseudo aleatoria. La secuencia usa una semilla de 4 bits que aplica una compuerta XOR al tercer y segundo bit para generar el nuevo valor del bit 0. En tercer lugar, la función codificar dato, combina los datos con la secuencia generada mediante la operación lógica XOR (OR exclusivo). Cada dato debe de ser combinado con todos los chirps de la secuencia generada. La habilitación de la lectura de datos se realiza una vez que el dato anterior ha sido transmitido en su totalidad, cuando se habilita se aplica un reset para volver a generar la secuencia pseudo aleatoria desde su inicio.

El programa principal generó el primer bit del código a transmitir. Para asegurar que el código se transmitía en un periodo constante se utilizó una subrutina de

interrupción interna; es decir, el microcontrolador ejecuta estas líneas del programa cuando un contador llega a cierto valor. Por ejemplo, si el contador llegó a un valor de 100 interrumpe el programa principal y las instrucciones en la subrutina son ejecutadas. El diagrama de flujo de la subrutina de interrupción se puede observar en la figura 4, dentro de la subrutina se encuentra un habilitador, el cual se colocó para evitar transmitir en ausencia de un dato nuevo. El habilitador mencionado anteriormente es opcional ya que la señal transmitida tendrá un habilitador externo que no estará gobernado por el microcontrolador que realizará la codificación.

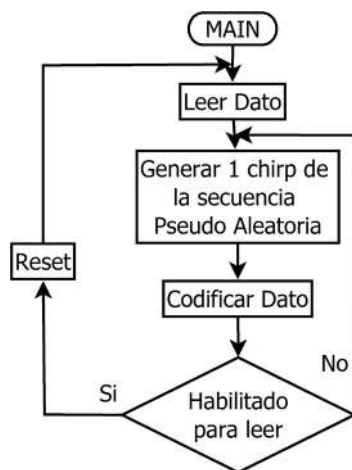


Figura 3. Diagrama de flujo del programa principal.

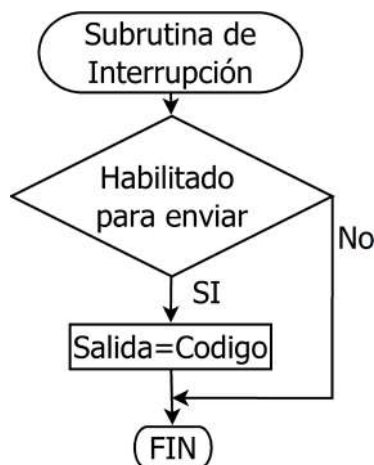


Figura 4. Diagrama de flujo de la transmisión de la data codificada.

2.3. Implementación de la Codificación

El algoritmo mostrado en las figuras 3 y 4 se implementó en un tarjeta de Arduino UNO, debido a que su lenguaje de alto nivel permitía revisar un prototipo de manera más rápida; sin embargo, para optimizar el código no se usó la función “DigitalWrite” que cambia el estado de un PIN de salida digital, alto o bajo voltaje; en su lugar, se modificó directamente el valor del registro que controla el estado del PIN.

Los microcontroladores tienen registros que gobiernan el estado del PIN de salida que va a controlar al multiplexor mostrado en la figura 1. Modificar directamente estos registros requiere un menor número de instrucciones que utilizar funciones de alto nivel.

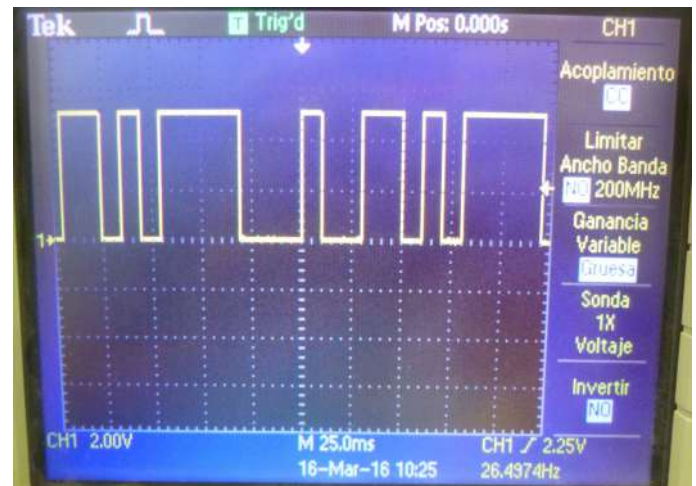


Figura 5. Señal de salida de un PIN del Arduino UNO en el que se implementó la decodificación.

En la figura 5 se muestra la medición realizada con un osciloscopio al PIN de salida de un arduino UNO, en el cual se implementó la codificación utilizando como semilla el valor de 1111 y el arreglo mostrado en la figura 6 obteniéndose la siguiente secuencia pseudo aleatoria “000100110101111” que es periódica. El dato que se codificó fue el número 12 que es representado como un número de 8 bits sin signo 0001100, cada bit del dato, en este caso 12, se combinó con la secuencia pseudo aleatoria utilizando la operación lógica XOR, con lo cual se obtiene la siguiente secuencia “000100110101111” que representa a un bit con valor 0 del dato y la secuencia “111011001010000” que representa a un bit con valor 1.

En la gráfica generada por el osciloscopio se observa el valor codificado de un bit de valor 0 de los datos, la secuencia que representa al bit 0 comienza a partir del milisegundo 95 adelante. Además, se puede observar que el dato codificado se envía cada 10ms.

2.4. Simulación de la Modulación

Una vez codificada la señal, se requería ver los resultados al aplicar la modulación. Se utilizó modulación por desplazamiento de fase. La figura 6 muestra la simulación de la modulación. La frecuencia de la señal portadora es de 400MHz. Para poder observar mejor los resultados se aumentó la frecuencia de la señal codificada a una frecuencia de 50MHz. Cuando hay una transición entre un 0 y 1 lógico se puede observar el cambio de fase en la señal modulada.

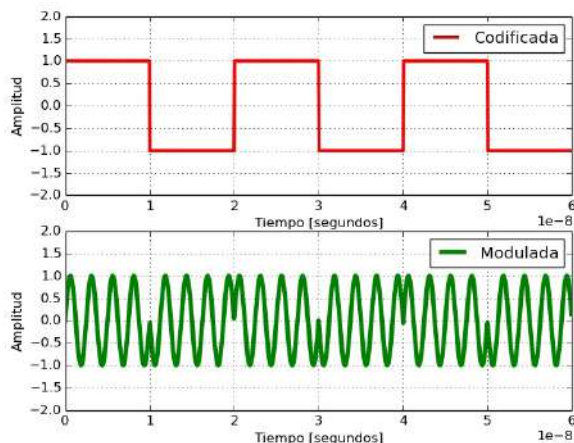


Figura 6. Resultados de la modulación.

2.5. Simulación de la demodulación

La etapa de demodulación consiste en multiplicar la señal modulada por otra señal que tenga la misma frecuencia y forma que la señal portadora. Luego, se filtra la señal resultante con un filtro pasa bajos cuya frecuencia de corte es la mitad de la frecuencia de la señal portadora, en este caso 200MHz. En la simulación de la demodulación se agregó ruido con distribución normal a la señal modulada para obtener resultados más cercanos a los reales. En la figura 7 se puede observar el diagrama de bloques del proceso descrito anteriormente. La simulaciones se realizaron utilizando Python y la herramienta Eclipse.

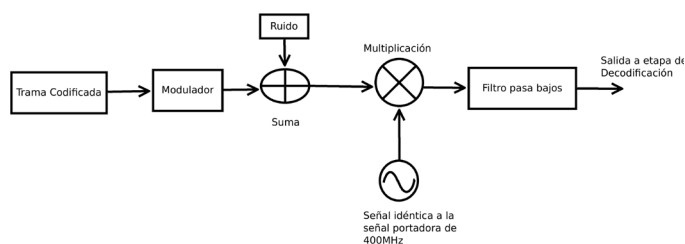


Figura 7. Diagrama de bloques de la demodulación.

En la figura 8 se muestra un ejemplo del proceso de demodulación mediante la simulación. En la parte superior se muestra la señal de color azul la cual es la señal modulada a la cual se le agregó ruido con distribución normal para obtener resultados más cercanos a los reales. En la parte inferior se puede observar en color rojo la señal codificada y en color verde la señal obtenida luego de la demodulación. En el primer bit, la señal filtrada presenta valores diferentes a los esperados, pero después de un ciclo la señal filtrada tiene picos similares a la señal codificada.

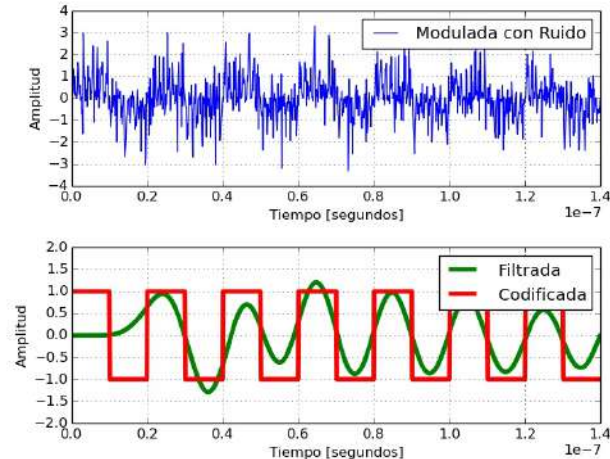


Figura 8 Resultados de la simulación de la demodulación.

2.6. Simulación de la decodificación

En la figura 9 se muestra el diagrama de bloques que representa los pasos realizados para la simulación de la decodificación y se muestra un ejemplo. En primer lugar, se codificó el número 15 representado como un número de 8 bits sin signo. Luego, a la trama resultante se le concatenó valores aleatorios de 0 y 1, tanto al inicio como al final de la trama para simular ruido. Finalmente, a la trama resultante se le aplicó la operación de la correlación con la secuencia pseudo aleatoria completa.

3. Discusión

Se debe de acceder a la subrutina de interrupción cuando la codificación ya ha sido realizada; es decir, primero se tiene que haber generado el código a transmitir antes de enviarlo como salida. Por ello, el periodo con el cual se accede a la subrutina debe de ser el doble del tiempo que le toma al microcontrolador realizar la decodificación.

Los resultados de la simulación de la modulación fueron los esperados, para poder visualizar mejor los cambios de fase se aumentó la frecuencia de la señal codificada, pero el algoritmo de modulación puede ser aplicable a diferentes frecuencias.

En la simulación de la demodulación no se incluyó el efecto doppler que afectará a la señal modulada recibida variando la frecuencia de la señal modulada en +/- 5KHz, debido a que el CubeSat se desplazará a altas velocidades (7km/s).

La decodificación utilizando la correlación funcionó como se esperaba mostrando la presencia de 1 o 0 lógicos en la secuencia correcta. El siguiente paso sería unir todas las etapas de codificación, modulación, demodulación y decodificación.

4. Conclusiones

Los estudios realizados muestran que el tiempo estimado que funcionará sin fallas un microcontrolador Atmega 128 de uso comercial a una altitud de 1000km

es de un mínimo de 5 años lo cual es cinco veces el tiempo de vida estimado del CubeSat.

Se logró implementar la codificación de la señal de Radio Beacon en un arduino UNO que tiene un microcontrolador Atmega328, utilizando una secuencia pseudo aleatoria basada en una semilla de 4 bits.

Se logró simular utilizando Python la modulación, demodulación y decodificación de la señal transmitida sin incluir el efecto doppler.

5. Agradecimientos

Mi agradecimiento al Radio Observatorio de Jicamarca, a mi asesor el Dr. Edgardo Pacheco por su guía y motivación durante el programa de prácticas, a los ingenieros José Chávez, Josemaría Gómez y Fernando Villanueva por su apoyo y amistad durante el desarrollo del proyecto.

6. Bibliografía

Armen Toorian, Ken Diaz, and Simon Lee. *The cubesat approach to space access*. In *Aerospace Conference*, 2008 IEEE, pages 1–14. IEEE, 2008.

EJ Daly, G Drolshagen, A Hilgers, and HDR Evans. *Space environment analysis: Experience and trends*. In *Environment Modeling for Space-Based Applications*, volume 392, page 15, 1996.

A Schuttauf, S Rakers, and C Daniel. *Radiation test of 8 bit microcontrollers atmega128 & at90can128*. In *2010 IEEE Radiation Effects Data Workshop*, 2010.

Barry George Evans. *Satellite communication systems*, volume 38. Iet, 1999.

DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA MECÁNICA MODULAR PARA MOVIMIENTOS VERTICAL Y HORIZONTAL DEL RADAR SAR, PARA MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS

DESIGN OF A MODULAR MECHANICAL STRUCTURE FOR VERTICAL AND HORIZONTAL MOVEMENTS OF THE SAR RADAR FOR LANDSLIDE MONITORING

Camilo Daniel Ortecho Huamanchumo

Universidad Nacional de Federico Villarreal
Facultad de Ingeniería Electrónica e Informática
daniel_coh@hotmail.com

Asesor: Ing. César De La Jara

Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

En el presente trabajo se expone el diseño de cada parte de la estructura mecánica, en un software de Diseño, denominado Autodesk Inventor 2015, teniendo en cuenta las especificaciones de los radares, y del Analizador de Redes, para que de tal forma puedan encajar sin ningún inconveniente en la estructura a diseñar. Se realiza el Ensamble en su totalidad para poder corroborar el funcionamiento de la estructura. Y por último se realiza la acotación de los planos de cada parte del proyecto que se usarán en su posterior diseño.

Palabras clave: estructura, radares, planos.

Abstract

In this work presents of design mechanical structure in the Software Autodesk Inventor 2015, having bill in specifications of the radars and the Networks Analyzer for such form can fit without any inconvenience in the structure design. The assembly is made in full to corroborate the operation of structure. And finally the dimension of the planes of each part of the project to be used in subsequent design is done.

Keywords: structure, radars, planes.

1. Introducción

El sistema de monitoreo de deslizamientos usando interferometría de radar es un proyecto que tiene como objetivo general la adquisición de datos en tiempo real para la evaluación de zonas de riesgo y prevención de desastres. El sistema está compuesto por una faja transportadora, motor a pasos, una plataforma electrónica, Antenas tipo Horn y el Analizador Vectorial de Redes. EL funcionamiento del sistema se basa en la adquisición de puntos en el espacio emitidos y recepcionados por las antenas que están empotradas en una plataforma fija, y que éste a su vez se encuentra acoplado a una base corrediza de la faja. De esta forma, gracias al movimiento horizontal continuo y la repetición de todo el barrido se logra obtener los datos necesarios que serán aplicados a un procesamiento, obteniendo como resultado la formación de una imagen en 2D (figura 1). El movimiento de la faja, es dado por un motor paso a paso, que éste a su vez es controlado por un driver y que para poder realizar la secuencia de barrido tiene que estar controlado por una plataforma electrónica, denominada Arduino Uno.

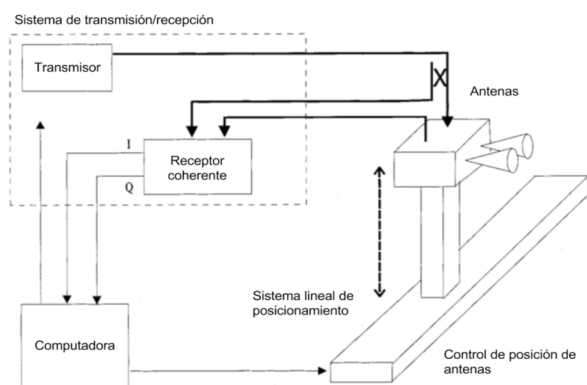


Figura 1. Diagrama de Bloques

El sistema SAR digitaliza y registra el conjunto de ecos recibidos para cada barrido frecuencia emitida. La repetición regular de estos barridos genera una matriz de dos dimensiones de datos SAR, la cual necesita ser procesada para poder interpretar la información que contiene ya que, sin tratarla, no es entendible. [3]

La captura de información se puede formular a partir del problema directo, en que un blanco se considera la unión de diferentes puntos de dispersión o blancos puntuales. El viaje sufrido por la señal emitida, genera un retraso en recepción, hecho que al procesar el eco proporcionará la información de posición del blanco puntual. [3]

Un punto dispersor, o blanco puntual, genera una señal ensanchada en la línea de medida de la formación de imagen afectada por los factores de

atenuación y la fase generada por el retraso, ambos dependientes de la distancia recorrida. [3]

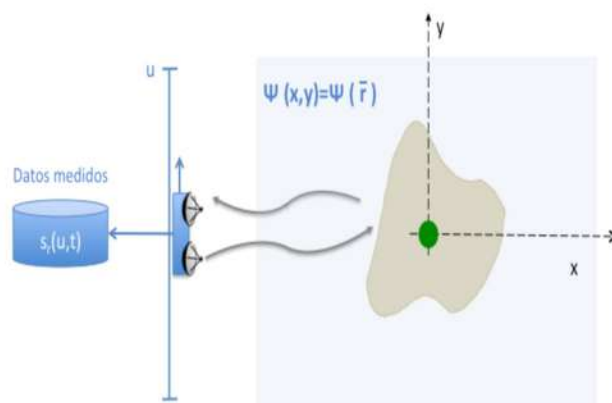


Figura 2. Captura de Imágenes

El sistema está compuesto por las siguientes partes:

- Faja Transportadora
- Motor paso a paso NEMA
- Tarjeta Arduino-Uno
- Antenas Tipo Horn
- Driver NI
- Analizador Vectorial de Redes

La instalación inicial incluye:

- Conexión del motor de a pasos, por intermedio de un acople de motor, a la faja transportadora.
- Conexión de cables del motor paso a paso a su respectivo Driver.
- Conexión del Driver a la tarjeta Arduino Uno.

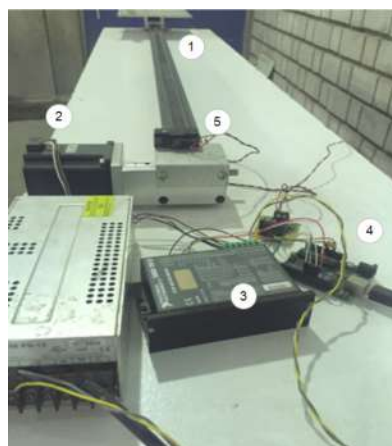


Figura 3. Sistema actual

3. Método

Se comenzó a diseñar en primera instancia desde la base hasta la parte más alta, donde se encontrarían las antenas. De esta manera se diseñó según este orden:

- **SEPARADOR:** Esta pieza fue diseñada porque se

necesitaba un bloque para separar la estructura en conjunto de la base de la corredera; y que a su vez sirva de “tope” para los interruptores de fin de carrera que se encuentran en cada extremo.

Una vez que se diseñó la pieza separadora, se comenzó a diseñar la siguiente parte de la estructura. Se comenzó con la pieza donde se encontraría ubicado el Analizador de Redes (VNA), de esta manera sentaríamos una base sólida, para que no exista problemas con la plataforma donde irían empotradas las antenas.

- **COMPARTIMIENTO:** Esta pieza se diseñó de tal manera que el Analizador Vectorial de Redes pueda entrar y salir sin restricciones, conservando de esta manera la integridad física del dispositivo. Para esta pieza se tomó en cuenta las dimensiones del Analizador.

Luego, se diseñó la pieza donde se apoyarían las columnas de la estructura, que a su vez es la pieza donde el motor iría sujeto.

- **BASE INFERIOR:** Esta base sirve de soporte para las varillas, que cumplen el rol de columna, y a su vez sujetan el motor.

Posteriormente se diseñó la base en la cual irían empotradas las antenas.

- **BASE MEDIA:** Para poder diseñar esta pieza se tomó en cuenta, que el material tiene que ser resistente y no se pandee, por eso se diseñó en acero inoxidable.

Para poder tener un movimiento de alabeo, se optó por diseñar unos pivotes, de esta manera colocando un pivote uno encima de otro, teniendo como eje de rotación un perno, y aprisionando con su tuerca respectiva, podemos ajustar y desajustar según a conveniencia.

- **PIVOTE:** Esta pieza se diseñó de tal forma que se pueda modificar el ángulo de elevación, debido a que es una pieza que iba directamente al perfil que sostiene las antenas, se diseñó en acero inoxidable, para no estar teniendo que hacerle su mantenimiento tan seguido.

Para poder empotrar las antenas en la estructura se necesitaba una pieza que tuviera la ligereza y dureza necesaria para no dañar la integridad física de las antenas.

- **ACOPLE:** Esta pieza se diseñó, según las especificaciones de la Antena. Debido a que esta pieza se necesita dureza y menor frecuencia de mantenimiento, se diseñó en acero inoxidable, para evitar calibrar a cada momento las antenas.

Para poder fijar las varillas de soporte, se necesitó a su vez una base superior.

- **BASE SUPERIOR:** Esta pieza fue diseñada en aluminio, de un grosor más grueso, debido a que iba a ir colocado el rodaje, para que la varilla conductora o esparrago, pueda tener libertad absoluta.

Con estas piezas en su totalidad, se ensambla y se tiene toda la estructura, para poder obtener el movimiento vertical, que se necesita.

4. Resultados

4.1. Partes diseñadas

Se muestra el diseño de cada pieza de la estructura mecánica.

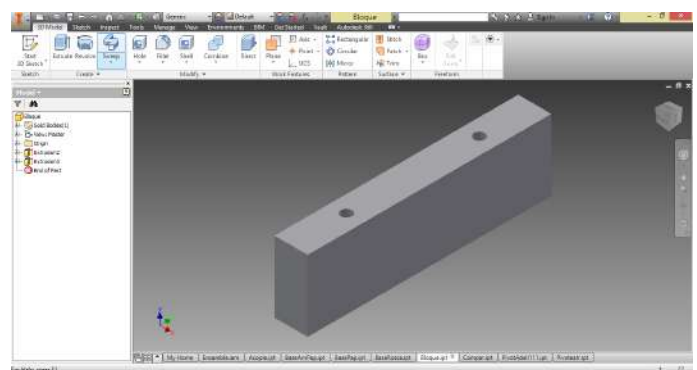


Figura 4. Vista Isométrica – Separador

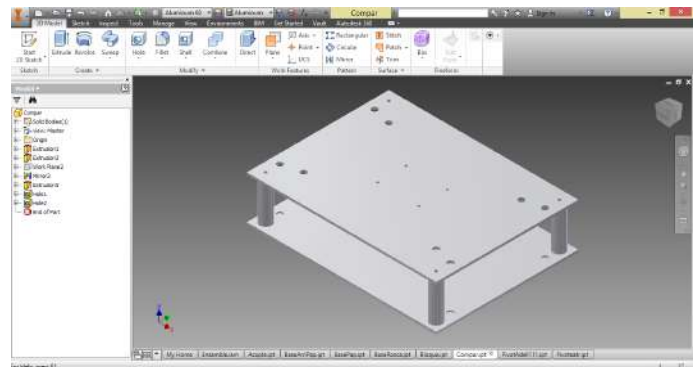


Figura 5. Vista Isométrica – Compartimiento ensamblado

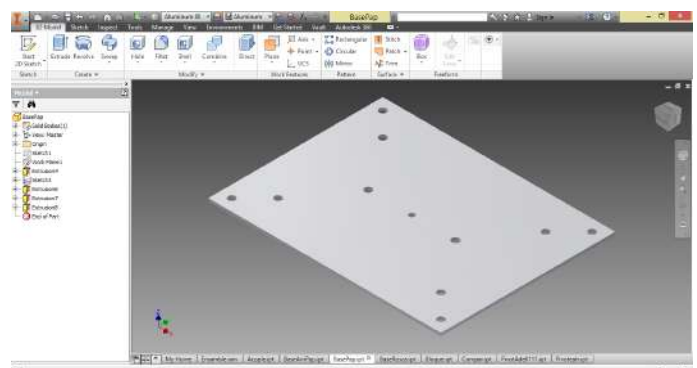


Figura 6. Vista Isométrica - Base Inferior

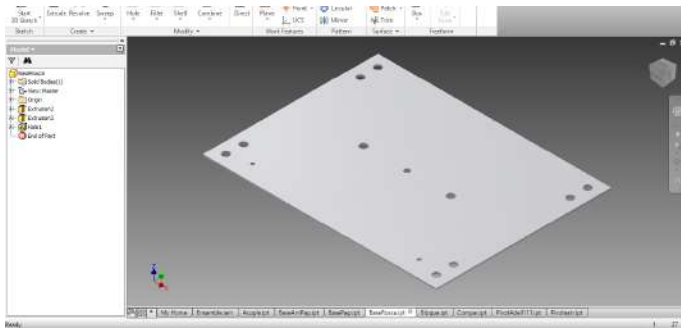


Figura 7. Vista Isométrica -Base Media.

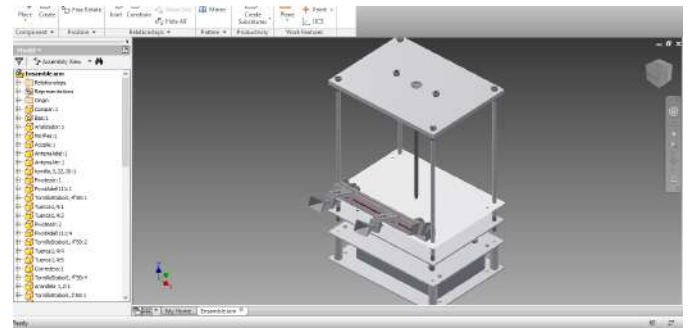


Figura 11. Ensamble con motor

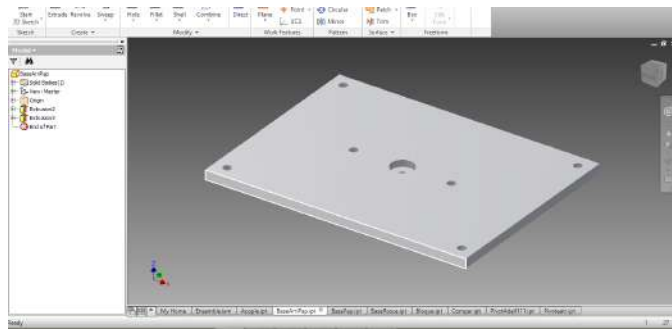


Figura 8. Vista Isométrica - Base Superior

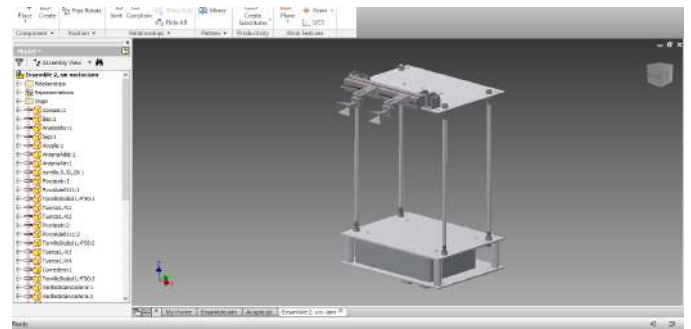


Figura 12. Ensamble sin motor.

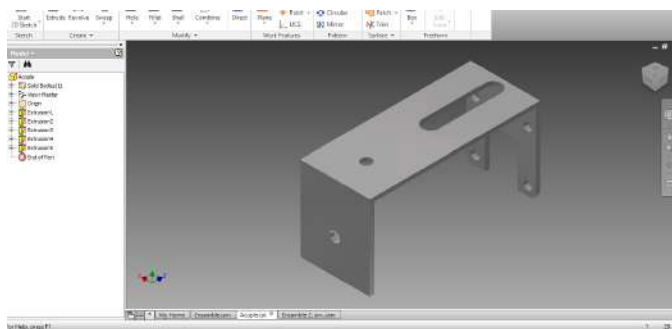


Figura 9. Vista Isométrica - Acople de Antena.

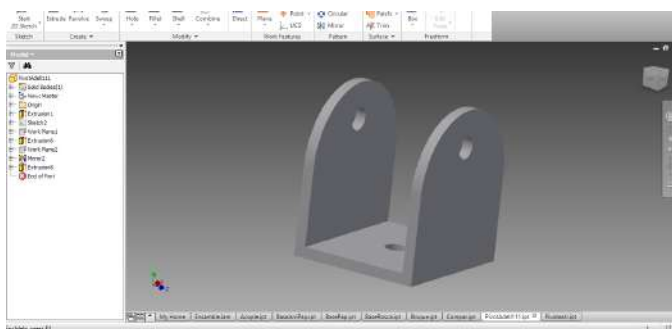


Figura 10. Vista Isométrica - Pivote Exterior - Interior

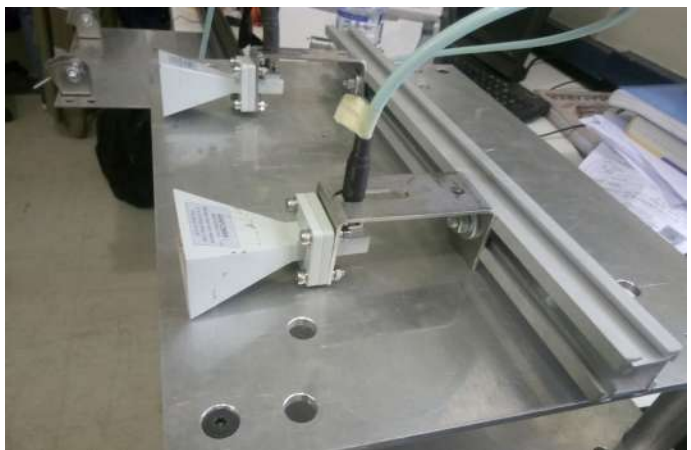


Figura 13. Antena – Acople - Baranda

4.3. Implementación de piezas diseñadas

En esta etapa de desarrollo de la implementación se realizaron distintos procesos a las piezas maquinadas, tales como:

- Proceso de Enroscado Interno
- Proceso de Enroscado Externo
- Proceso de Corte
- Proceso de Limado



Figura 14. Ensamble al 70%



Figura 15. Ensamble al 100%



Figura 16. Prueba de Funcionamiento con la estructura implementada

5. Discusión

Para diseñar estructuras mecánicas, se recomienda utilizar los programas Inventor o Solidwork, debido a que permiten la simulación dinámica de todo el ensamble, y por las herramientas con las que cuentan. También se recomienda diseñar piezas que sean sencillas de fabricar.

El diseño inicial de la estructura permitía únicamente los movimientos vertical y horizontal de las antenas, posteriormente se le añadieron piezas para permitir modificar su ángulo de elevación.

Para facilitar la fabricación de las piezas, los planos deben estar acotados con claridad y sin redundancias. Se recomienda también utilizar tolerancias.

6. Conclusiones

Se logró el diseño de cada pieza para la estructura, con la ayuda de las indicaciones del equipo encargado del Radar SAR.

Se realizó los planos de cada pieza, acotada debidamente para que no exista confusión alguna.

Se le colocó un peso de 20Kg al deslizador, debido a que el peso de la estructura es de 18Kg aprox., obteniendo resultados favorables.

Se realizó rosca interna y externa a algunas piezas según los planos de ensamble.

Se optó por el ensamble sin motor, debido a observaciones del equipo SAR.

Se logró el ensamble de toda la estructura, posicionando las antenas y el VNA en su respectivo lugar.

Se realizó pruebas de funcionamiento.

7. Agradecimientos

Mi agradecimiento al Radio Observatorio de Jicamarca, por haberme dado la oportunidad de pertenecer a su programa de Practicas Pre-Profesionales, y mi más sincero agradecimiento al Ing. César De La Jara por su gran apoyo y sus puntuales acotaciones, que hicieron que el proyecto tenga una mejor performance.

8. Bibliografía

Especificaciones del Analizador de redes (VNA)
<https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Brochures-Datasheets-Catalogs/datasheet/11410-00548R.pdf>

Especificaciones de la Antena http://www.ainfoinc.com/en/pro_pdf/new_products/antenna/Standard%20Gain%20Horn%20Antenna/tr_LB-62-15.pdf

“FORMACIÓN DE IMÁGENES RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (SAR) DE PRECISIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE RETROPROYECCIÓN”, Ing. Mónica Sensat Nogués, 2015.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE RECARGA AUTÓNOMA PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO PARA EL MONITOREO DE VOLCANES

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN AUTONOMOUS RECHARGING STATION FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR VOLCANO MONITORING

Alessandro Morales Saravia

Universidad Nacional del Callao
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
alessandro.morales@jro.igp.gob.pe

Asesor: Danny Scipión, Ph. D.

Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

Se desea enviar un vehículo aéreo no tripulado cerca del volcán Ubinas (5672 m.s.n.m.) para estudiar y caracterizar la actividad volcánica, pero este sólo proporciona una autonomía de vuelo de máximo 20 minutos. En este informe, se muestran las consideraciones que debe tener un sistema de recarga de energía para garantizar que el vehículo aéreo no tripulado complete la misión de vigilar el volcán con la menor intervención humana posible. A su vez, se analiza el consumo de energía del dron teniendo en cuenta las condiciones climáticas de vuelo. También se realizó un estudio de campo para determinar los puntos de despegue/aterrizaje y la ubicación de los sistemas de recarga, así como la trayectoria de vuelo. Finalmente se detalla el material necesario para la implementación del sistema.

Palabras clave: sistema de recarga, uav, autonomía de vuelo, monitoreo de volcanes.

Abstract

An unmanned aerial vehicle (UAV) will be send near the Ubinas volcano (5672 m.a.s.l.) to study and characterize volcanic activity, but it only provides a flight range of 20 minutes. In this report are shown the considerations that an energy recharge system must have to ensure that UAV completes the mission to monitor the volcano with less human intervention. Also an analysis of drone's energy consumption was made taking into account the climatic conditions of the flying. A field study was also conducted to determine the points of takeoff/landing and location of recharging systems, as well as the flight path. Finally the details of the material needed for the implementation of the system are described.

Keywords: recharging system, uav, flight range, volcano monitoring.

1. Introducción

Actualmente el uso de los vehículos aéreos no tripulados, también llamados drones, se ha extendido de una manera impresionante. Aunque comenzaron siendo usados para aplicaciones militares, ahora también se les utiliza para la captura de videos y fotos de alta resolución en zonas de difícil acceso con fines artísticos, periodísticos o de pasatiempo. Asimismo, se les utiliza para la entrega o delivery de paquetes (todavía en fase de prueba) y recientemente para la toma de datos con sensores integrados para la realización de estudios con fines científicos.

Es preciso destacar que hay un factor que limita su uso a no solo la imaginación y este es el tiempo de vuelo, sobre todo cuando recargar el dron implica en muchos casos interrumpir el desarrollo de la misión predeterminada. Esto sucede mayormente cuando se requiere realizar el recorrido de trayectorias largas bajo condiciones ambientales desfavorables como es el caso del ascenso a un volcán en actividad como veremos más adelante.

En ese sentido, el presente trabajo de investigación plantea el diseño y la implementación de una estación de recarga autónoma para un vehículo aéreo no tripulado de seis motores que facilite una carga rápida para completar la misión exitosamente.

2. Problema

En el Perú, la cadena volcánica está constituida aproximadamente por 50 volcanes (activos e inactivos) y todos se ubican en la región Sur del Perú sobre la Cordillera Occidental [1]. De estos volcanes el Ubinas, estratovolcán de 5.400 metros de altitud, es considerado como el volcán más activo del Perú ya que se han registrado 25 pequeñas erupciones desde 1550 con una recurrencia de 4 a 5 episodios por siglo, caracterizadas por una alta actividad fumarólica y emisiones de cenizas que han generado daños considerables en centros poblados y cultivos, causando la muerte de personas y la desaparición de ganado a consecuencia de epidemias desconocidas [2].

Con la finalidad de prevenir estos desastres el Observatorio Vulcanológico del Sur (OVS), perteneciente al Instituto Geofísico del Perú (IGP), viene estudiando el comportamiento del volcán Ubinas a través de tareas de monitoreo sísmico mediante el envío periódico de personal técnico y científico a las inmediaciones del volcán para realizar capturas fotográficas y tomas de video. Esta es una labor muy peligrosa ya que en cualquier momento el volcán podría comenzar a erupcionar y causar pérdidas humanas.

Un vehículo aéreo no tripulado, al cual también nos referiremos como dron, es una aeronave cuyas características permiten que sea utilizada para misiones de alto riesgo sin la preocupación de que estas impliquen la pérdida más grande que se pueda ocasionar ante un accidente, una vida humana. Es en este contexto que el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), sede científica del IGP, en coordinación con el OVS planteó el desarrollo de dos vehículos aéreos no tripulados para realizar la misión de monitoreo del volcán Ubinas. Uno de estos vehículos viene dado por un avión a pequeña escala y el otro es un dron de seis motores también llamado hexacóptero.

El proyecto cuenta con el financiamiento del Fondo para la Innovación, Ciencia y Tecnología (FINCyT) bajo la marca de Innóvate Perú y la participación del Grupo de Investigación de Sistemas Aéreos No Tripulados (GI-SANT) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Este último tiene dentro de su equipo de trabajo al ingeniero aeronáutico Carlos Saito quien con su vasta experiencia en el campo calculó que el hexacóptero sólo iba a contar con aproximadamente 20 minutos de autonomía de vuelo. Esto generó una problemática ya que la trayectoria estimada de vuelo no se cumpliría con tal cantidad de tiempo de autonomía, de ello se desprende la necesidad de desarrollar un sistema de recarga energética para el dron a fin de que complete la misión.

3. Antecedentes del estudio

A continuación se presentarán las investigaciones realizadas hasta el momento sobre los sistemas de recarga para vehículos aéreos no tripulados.

3.1. Carga inalámbrica con bobinas

Este tipo de carga se basa en la transmisión de potencia magnética inalámbricamente a través de bobinas resonantes. Griffin & Detweiler, 2012 [3] aplican este método para la recarga de sensores en tierra desde un quadcopter (dron de cuatro motores) y se infiere la posibilidad de usarlo en el sentido inverso, es decir, para recargar al UAV con una estación transmisora en tierra (Figura 1).

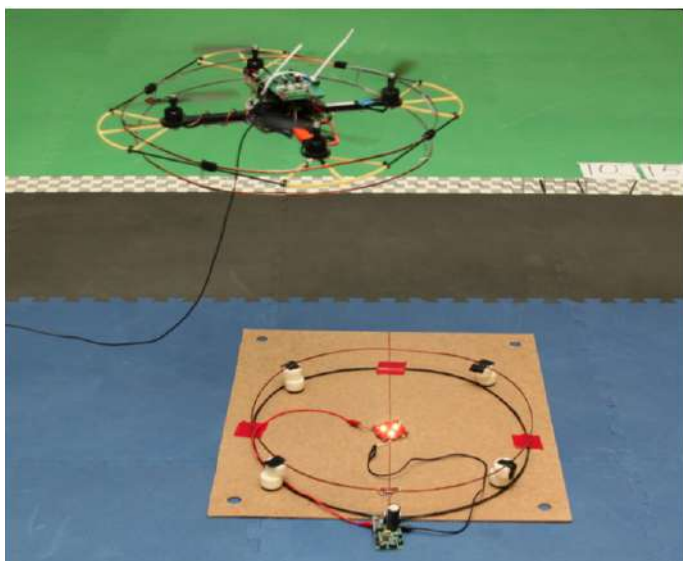


Figura 1. UAV en vuelo transmitiendo potencia inalámbricamente mediante bobinas resonantes para recargar un sensor en tierra. Esta transmisión se visualiza mediante el encendido de un LED. Fuente: Griffin & Detweiler, 2012

3.2. Cambio/Recarga de baterías

Este sistema se basa en el cambio (swap) y recarga de las baterías del UAV haciendo uso de un mecanismo electromecánico. En Toksoz et al., 2011 [4] se detalla el desarrollo de una plataforma autónoma para el cambio y carga de la batería de un quadcopter para la ejecución de misiones de larga duración. Los elementos principales de la plataforma se observan en la Figura 2.

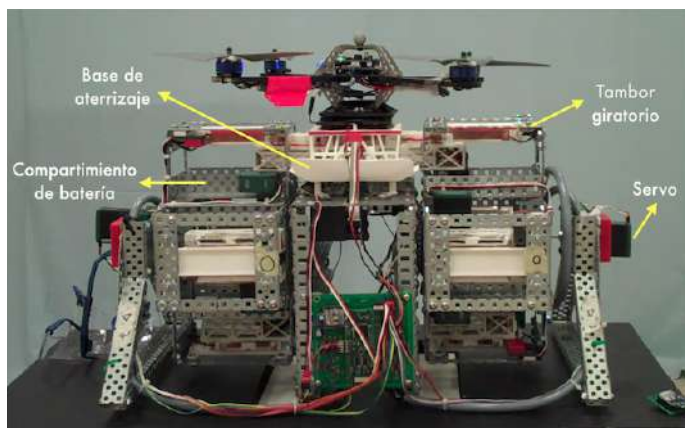


Figura 2. Estación de cambio y carga de baterías para un quadcopter mediante el uso de una plataforma electromecánica autónoma. Adaptado de: Toksoz et al., 2011

3.3. Carga láser

La empresa norteamericana de ingeniería LaserMotive, LLC se encarga actualmente de desarrollar tecnología para la transmisión de potencia vía láser. En uno de sus reportes [5] exponen un sistema de carga láser para un UAV en vuelo, el esquema se puede observar en la Figura 3.

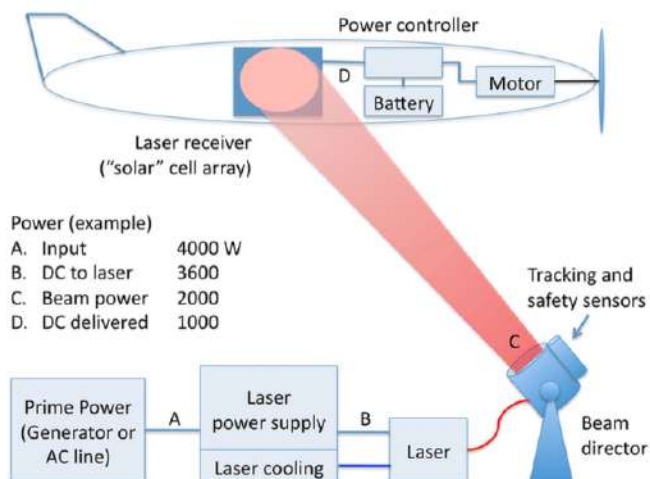


Figura 3. Esquema que muestra los elementos del sistema de transmisión de potencia inalámbrica a un UAV usando un haz de luz (láser). Fuente: LaserMotive, 2010

3.4. Carga por conducción

Se realiza a través de una plataforma metálica o pad que conduce la corriente de carga desde la fuente hasta las baterías por medio de unos pines conductores colocados en las patas del dron. En la Figura 4 se observa el sistema de recarga implementado por la empresa Skysense, el cual aplica la carga por conducción.



Figura 4. Sistema de recarga usando plataforma conductora. Fuente: skysense.co

4. Consideraciones

El vehículo aéreo no tripulado considerado para el diseño del sistema de recarga es un hexacóptero, el cual es una aeronave tipo aerodino de ala giratoria que cuenta con seis rotores.

Para evaluar el consumo energético del hexacóptero se utilizó el software eCalc (<http://www.ecalc.ch/>). Al completar todos los parámetros requeridos obtenemos que el tiempo de vuelo será de tan solo 20.8 min, como se muestra en la Figura 5.

Observaciones:	
Batería	
Carga:	6.18 C
Voltaje:	26.83 V
Tensión nominal:	25.90 V
Capacidad:	22000 mAh
Energía:	569.8 Wh
Tiempo de vuelo:	9.7 min
tiempo medio de vuelo:	20.8 min
Tiempo de vuelo estacionario:	25.3 min
Peso:	3010 g
	106.2 oz

Figura 5. Resultados obtenidos con el software eCalc.

A su vez se realizó un estudio de campo para determinar la ubicación tentativa del punto de despegue. Entre los posibles puntos, se determinaron 3 opciones: Ubinas, Piscococha y UB1 (Figura 6). De los cuales se eligió el punto ubicado en la estación sísmica UB1, por ser el más cercano al cráter del volcán.



Figura 6. Ubicación de los posibles puntos de despegue del hexacóptero. Se eligió el punto UB1 debido a la cercanía al cráter.

Una vez escogido el punto de despegue se procedió a simular la trayectoria de vuelo del dron (Figura 7), en la cual se observó que a partir del minuto 15' (a los 5km de recorrido) la batería se encontraría a un 25% de su capacidad y a los 21' se agotaría por completo. Se recomienda que la batería no baje del 30% de su capacidad para poder garantizar un tiempo de vida útil rentable.



Figura 7. Trayectoria de vuelo simulada para el hexacóptero en la cual se observa que la batería no rinde para completar la misión.

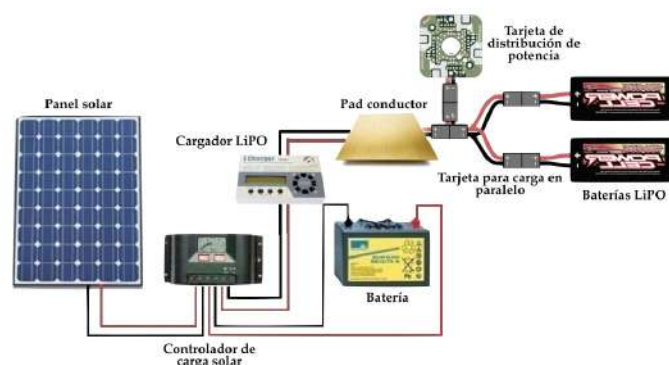


Figura 8. Diagrama esquemático del sistema de recarga usando pad conductor. En este se observan los componentes requeridos para la implementación del mismo.

5. Diseño

Para el diseño del sistema de recarga se consideraron tres etapas. La primera corresponde a la alimentación o fuente, la cual se basa en un sistema fotovoltaico compuesto por un panel solar tipo monocristalino de 200 W, un controlador de carga de 30 A y una batería de ciclo profundo de 65 Ah. La segunda etapa comprende tanto al cargador LiPO de 1000 W como al pad conductor de cobre de 1m x 1m. Y la última consta de una tarjeta de carga en paralelo conectada a las dos baterías LiPO de 7 celdas (25.9 V) y 11000 mAh cada una así como la tarjeta de distribución de potencia ubicada en el dron. Los materiales mencionados se pueden observar en la Figura 8.

A su vez, para el aterrizaje del dron en la plataforma de recarga se ha considerado la utilización del módulo IR-LOCK, el cual permite un aterrizaje bastante preciso haciendo uso de su sistema de tracking mediante infrarrojo y una cámara. Cabe resaltar que este módulo es compatible con el controlador de vuelo Pixhawk utilizado para el hexacóptero de manera que su aplicación es directa.

6. Pruebas

Hasta el momento se han realizado pruebas de carga usando una plataforma con láminas de aluminio, la cual carga la batería LiPO de 3 celdas (11.1 V) y 2650 mAh de un quadcopter modelo F450.

T. Toksoz, J. Redding, M. Michini, B. Michini, J. How, M. Vavrina, and J. Vian, "Automated battery swap and recharge to enable persistent UAV missions," in *AIAA Infotech@Aerospace Conference* (2011).

T. Nugent and J. Kare, "Laser Power for UAVs," Marzo 2010. [Online]. Available: <http://lasermotive.com/wp-content/uploads/2010/04/Wireless-Power-for-UAVs-March2010.pdf>

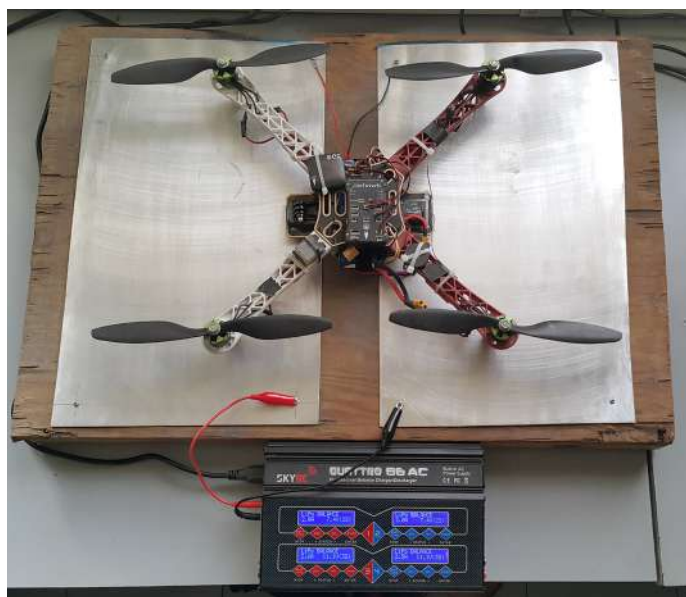


Figura 9. Prototipo del sistema de recarga usando pad de aluminio para cargar las baterías de un quadcopter modelo F450

En las pruebas realizadas no se observaron problemas de conducción aunque es necesario resaltar que la corriente de carga fue de 2.6 A muy por debajo de la requerida por el hexacóptero, la cual es de 22 A.

7. Agradecimientos

Deseo agradecer al Radio Observatorio de Jicamarca y al Instituto Geofísico del Perú por facilitar los recursos necesarios para la realización de la presente investigación. A su vez, agradecer al Dr. Danny Scipión por su apoyo y motivación constante.

8. Bibliografía

Y. Antayhua and H. Tavera, "Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya," 2003. [Online]. Available: http://www.igp.gob.pe/portal/images/documents/64/publicaciones/otras_publicaciones/monografias/volcanes_sismos_antayhua_tavera.pdf

Instituto Geofísico del Perú, "El volcán Ubinas," *Reporte Anual: volcanes activos en el sur del Perú*, pp. 6–17, 2014.

B. Griffin and C. Detweiler, "Resonant wireless power transfer to ground sensors from a UAV," in *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, May 2012, pp. 2660–2665.

ESTIMACIÓN DE VIENTOS MLT A PARTIR DE DATOS DE COLAS DE METEOROS APLICANDO LA TÉCNICA DBS

MLT WINDS ESTIMATION BY APPLYING DBS TO METEOR TRAILS

Oscar Adán Acevedo Sánchez

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ciencias
oscar.acevedo@jro.igp.gob.pe

Asesor: Danny Scipión, Ph. D.

Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

Denomínase meteoro la ablación de un meteoróide en la atmósfera. Dichos meteoroides son objetos provenientes del espacio ultraterrestre, generalmente partículas de polvo que quedan como remanentes del paso de un cometa o que no lograron formar parte de algún objeto mayor durante la formación del Sistema Solar. Al ingresar en la atmósfera, estos objetos ionizan el aire, generalmente a altitudes de entre 85 y 115 km [Sugar2010], dejando tras de sí una estela o cola, a partir de la cual puede extraerse información relevante para el estudio de la mesósfera y baja termósfera (MLT, por sus siglas en inglés). Una manera de obtener los vientos MLT es mediante el uso de solo las colas de meteoros detectadas por antenas receptoras cercanas y la aplicación de la interferometría a los beams apuntando en direcciones verticales [Oppenheim 2009, 2014].

En este trabajo fue usado un conjunto diferente de datos para obtener las velocidades horizontales del viento. El experimento fue configurado para estudiar la atmósfera neutra apuntando cuatro beams en direcciones no coplanares. Sin embargo, ecos de meteoros también fueron detectados durante dicha campaña, los cuales también pueden ser utilizados para medir los vientos MLT utilizando únicamente las colas de los meteoros detectados en tres o más beams y que tengan una duración de al menos 5 segundos, utilizando la técnica Doppler Beam Swinging. La técnica solo puede ser utilizada cuando las cabezas de los meteoros son removidas y el Electrochorro Ecuatorial no está presente. Los datos obtenidos por el radar principal del ROJ el 26 de Enero de 2016 fueron usados para probar los algoritmos.

Palabras clave: meteoro, radar, viento, mesósfera, baja termósfera.

Abstract

A meteor is a meteoroid ablation in the atmosphere. These meteoroids are objects from outer space, usually dust particles remain of the passing of a comet or failed to form part of some larger object during the formation of the Solar System. By entering the atmosphere, these objects ionize the air, usually at altitudes between 85 and 115 km [Sugar 2010], leaving behind a trail or tail, from which you can extract information relevant to the study of the mesosphere and lower thermosphere (MLT). One approach to obtain MLT winds is by using only meteor trails detected by close receiving antennas and applying interferometry to the vertically pointing beams [Oppenheim 2009, 2014].

In this paper, a different set of data is used to obtain the horizontal winds. The experiment was set to measure the neutral atmosphere by synthesizing four beams pointing in non-coplanar directions. However, meteor echoes were also detected during the campaign, which might also be used to measure the MLT winds by using only the meteor trails detected in three or more beams and that lasts more than 5 seconds using the Doppler Beam Swinging technique. The technique can only be applied when the meteor heads are removed and the Equatorial Electro Jet is not present. Data obtained with the main JRO radar on January 26, 2016 were used for testing the algorithms.

Keywords: meteor, radar, wind, mesosphere, low thermosphere.

1. Introducción

Existen varias técnicas para medir la velocidad de los vientos utilizando un radar. Una de ellas es por medio de la velocidad de las colas de los meteoros registrando las proyecciones de la misma sobre la dirección del haz que emana el radar. Así, dirigiendo cada cuarto del mismo hacia una dirección diferente se hace posible calcular las tres componentes de la velocidad del viento mediante la solución simultánea de un sistema de ecuaciones.

Para que aquello sea posible es necesario detectar las colas de meteoros eliminando las cabezas, pues estas poseen una velocidad entre 11 y 72 km/s que puede alterar significativamente los resultados. Esto se ha realizado con cierto éxito en el caso en el que los cuatro cuartos del radar del ROJ apuntan verticalmente para el caso en que el EEJ no está presente [Chahuara2015]. Sin embargo, al querer utilizarse la técnica DBS surgen dificultades por la necesidad de no utilizar técnicas de correlaciones cruzadas. Para lograrlo, se ha implementado en una rama del proyecto Signal Chain [Suárez2013] desarrollado en el ROJ, algoritmos en lenguaje Python que permitan la remoción de las cabezas de meteoros y la validación de las colas de larga duración. Estos datos se almacenan en archivos hdf5 que luego son leídos y procesados para, a partir de ellos, calcular la velocidad del viento.

2. Datos

Los datos utilizados para la prueba de los algoritmos implementados fueron los tomados en los experimentos realizados con el radar principal del ROJ en los días 31 de Octubre de 2013 y 26 de Enero de 2016. Ambos experimentos estuvieron configurados de distinta manera, el primero tomando datos de forma continua y el segundo tomándolos alternadamente con otros experimentos. Por esta razón, cada uno de dichos conjuntos de datos debió ser procesado de manera ligeramente diferente, si bien la técnica de remoción de cabezas, validación de colas y estimación de vientos. Se consideró solo los intervalos de tiempo en que el Electrochorro Ecuatorial (EEJ) no estaba presente, entre las 06:30 y 07:30, aproximadamente.

3. Desarrollo

3.1. Fundamento teórico

Los radares utilizan señales de radiofrecuencia para la detección de objetos y son capaces de medir su velocidad mediante el efecto Doppler electromagnético. Por esta razón es posible su uso para la medición de vientos en la atmósfera,

por ejemplo a través de la velocidad de las colas de meteoros. El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, sin embargo, impone un límite (velocidad Nyquist) a partir del cual las velocidades toman valores aparentes (velocidad alias), que está determinado por el tiempo entre pulsos emitidos.

Por otro lado, la resolución en rango es proporcional al mismo periodo (expresado en km: IPP), mejorando cuando el IPP es pequeño, en tanto que la potencia es mayor cuanto más largo sea. Para compensar ambos requerimientos se realiza una codificación de la señal emitida, lo que permite comprimir la energía de varios baudios [Galindo2007]

Los datos adquiridos por el radar del ROJ son almacenados en archivos tipo rawdata (con extensión '.r'), en el que los voltajes toman valores complejos, en arreglos tridimensionales de canales, rangos y perfiles. Estos son procesados dentro del proyecto Signal Chain.

3.2. Preprocesamiento de datos y cálculo de parámetros estadísticos

Puesto que la información relevante no se encuentra en todas las alturas (los meteoros se producen casi todos en el rango de 90 a 110 km [Sugar2010]), se selecciona solo aquellos rangos que les correspondan, tomando la parte del arreglo que los contenga.

Asimismo, haber codificado la señal transmitida hace necesaria la decodificación de la recibida. Para ello se realiza el cálculo según [Galindo2007]:

$$P_i(r) = \rho_{f_i, f_i}(r, 0)$$

La SNR es calculada según [Hildebrand1974] como:

$$SNR_i = 10 \log \left(\frac{P_i - ruido}{ruido} \right)$$

El ruido aquí es estimado como la señal presente en el 20% de datos con más baja potencia.

- Velocidad Doppler radial del canal i-ésimo:

$$v_{r,i} = \frac{\lambda}{4\pi T_s} \angle ACF_i$$

Siendo $\angle ACF$ la fase de la autocorrelación del canal.

- Ancho espectral:

$$\sigma_{vi} = \frac{\lambda}{2\sqrt{6}\pi T_s} \left\{ \ln \left(\frac{|\rho_{i,i}(1)|}{|\rho_{i,i}(2)|} \right) \right\}^{1/2}$$

Donde se toma la magnitud de las autocorrelaciones con retardo 1 y 2.

3.3. Método utilizado para remoción de cabezas

El método propuesto en [Chahuara2015] para la remoción de cabezas no es aplicable aquí por no poderse utilizar correlaciones cruzadas. En su lugar se realiza el procedimiento resumido en el diagrama de flujo de la Figura 1.

El filtro espacial utilizado sobre la imagen binarizada (según SNR, dependiente del experimento: umbralizando a 5 para el del 31/10/2013 y nivel de potencia a 62 para el 26/01/2016. En este último caso se utilizó potencia debido a que por la configuración del experimento la concatenación de perfiles debía ser posterior al cálculo de SNR, con lo que se asignaba un nivel de ruido diferente a cada perfil, resultando una imagen inhomogénea de difícil umbralizado) tiene la forma presentada en la Figura 2.

Este filtro se coloca centrado en cada píxel y se realiza el promedio ponderado con los pesos del filtro. Su tamaño se fija en 0,4 s. Puesto que las cabezas más anchas tienen una duración de 0,3 s, se umbraliza a 0,8 el resultado de aplicar este filtro, logrando remover la mayoría de cabezas. Para remover las que cruzan la cola de otro meteoro se realiza cerradura morfológica, encontrando las regiones en las que se encuentran los objetos, se calcula el promedio y desviación estándar de SNR y velocidad y se eliminan aquellos puntos en los que estos datos se alejan más del promedio de lo que lo permiten las desviaciones estándar.

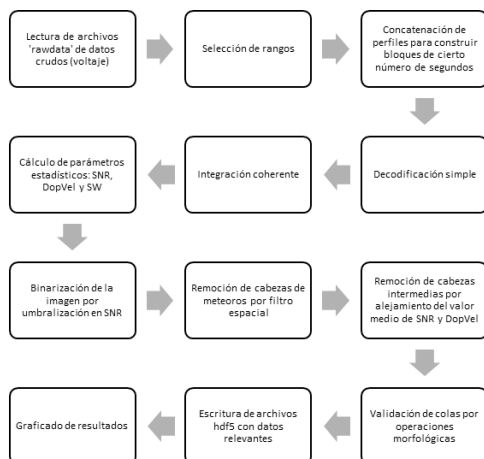


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de remoción de cabezas de meteoros

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
2	1	1	1	1
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

Figura 2: Filtro espacial utilizado

La validación de colas se basa en [Oppenheim2009], que afirma que con colas mayores a 3 s de duración la estimación de vientos puede hacerse con una precisión de 10 m/s. Se validaron las colas con duración mayor o igual que 5 s y ocupando un intervalo de rangos de 2 km o más.

Este procesamiento de los datos toma un tiempo relativamente largo, razón por la cual se escribe la información relevante en archivos hdf5 para su posterior uso.

3.4 Estimación de vientos

Si θ_i es el ángulo azimutal del beam del canal i -ésimo del radar y ϕ_i el zenital, la velocidad radial del viento en ese canal será:

Siendo u la velocidad zonal, v la meridional y w la vertical. Estas llevan a un sistema de ecuaciones que puede ser resuelto linealmente si hay información en por lo menos tres canales y por el método de mínimos cuadrados si la hay en los cuatro.

Resultados

En la Figura 3 se muestra el gráfico de potencia correspondiente a datos del día 26/01/2016 para el canal 1 (los otros canales son similares).

$$v_{R,i} = u \sin(\theta_i) \sin(\phi_i) + v \cos(\theta_i) \sin(\phi_i) + w \cos(\phi_i)$$

Siendo u la velocidad zonal, v la meridional y w la vertical. Estas llevan a un sistema de ecuaciones que puede ser resuelto linealmente si hay información en por lo menos tres canales y por el método de mínimos cuadrados si la hay en los cuatro.

4. Resultados

En la Figura 3 se muestra el gráfico de potencia correspondiente a datos del día 26/01/2016 para el canal 1 (los otros canales son similares).

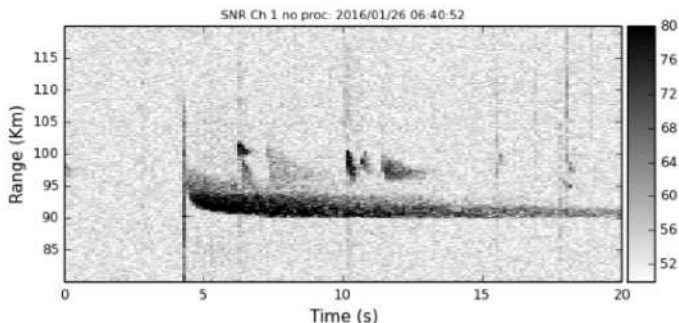


Figura 3. Potencia sin procesar de cabeza y cola de meteoro para el día 26/01/2016

La información relevante de los datos procesados se escribió en archivos hdf5 como el mostrado en la Figura 5.

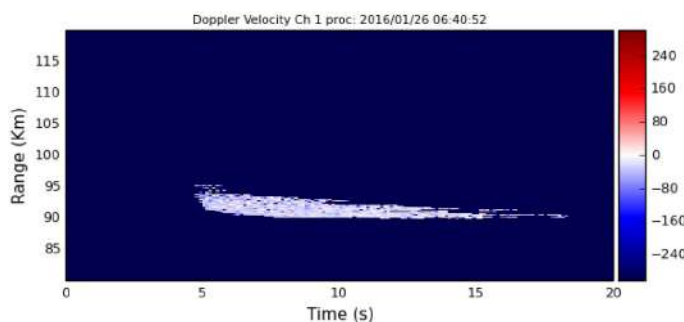


Figura 4. Velocidad Doppler de la cola de un meteoro con cabeza removida (26/01/2016)

La información relevante de los datos procesados se escribió en archivos hdf5 como el mostrado en la Figura 5.

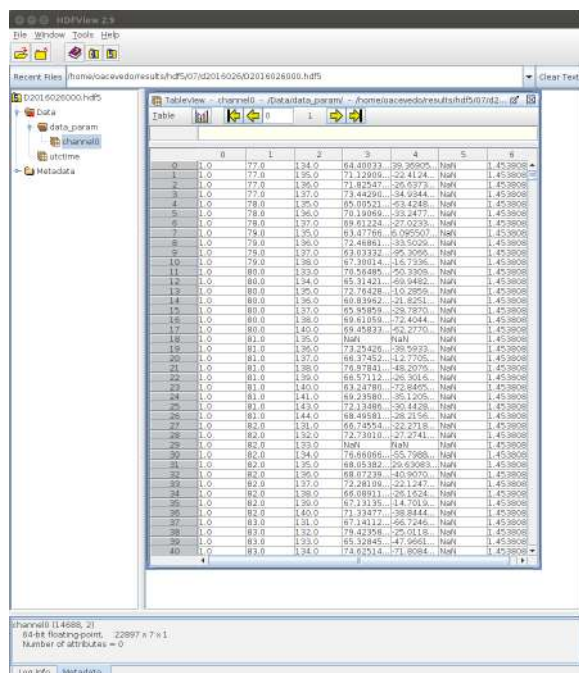


Figura 5. Ejemplo de archivo hdf5 con información relevante almacenada.

A partir de ellos se obtuvo la velocidad radial del viento por canal, mostrado en la Figura 6. Estos resultados reúnen 50 minutos de datos, obtenidos a partir de las 6:25 a.m., promediando cada 10 minutos y 3 km. Además, por la técnica DBS se obtuvo las tres componentes de la velocidad del viento, resultado mostrado en la Figura 7.

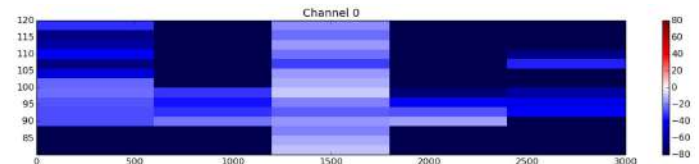


Figura 6: Velocidad radial del viento para el canal 0 el 26/01/2016. Datos de 50 minutos a partir de las 6:25 a.m. Promedio cada 10 minutos y 3 km.

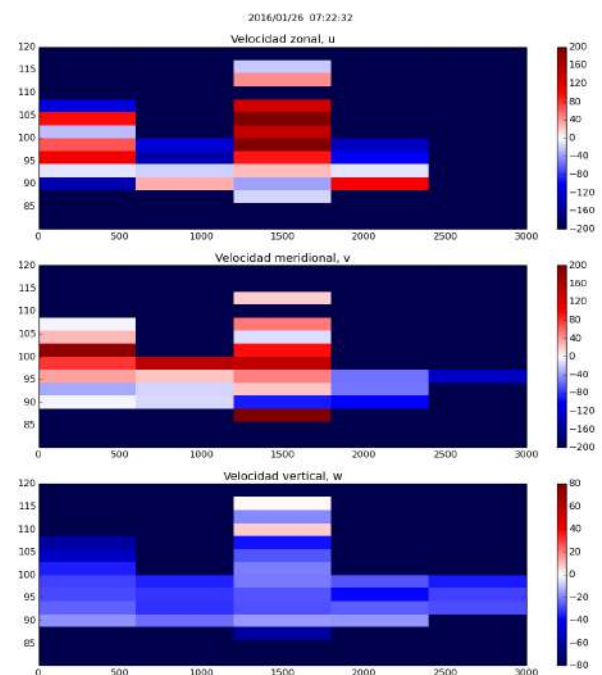


Figura 7. Componentes de la velocidad del viento

5. Discusión

El valor umbral de SNR o nivel de potencia para la generación de la imagen binaria debe ser establecido para cada experimento, pues depende del número de baudios del pulso transmitido y el código utilizado. Asimismo, los tamaños del filtro espacial y el del elemento estructurante usado en la validación de colas deben ser definidos óptimamente según sea el experimento.

Los resultados obtenidos para la velocidad del viento son cercanos a los obtenidos por otras técnicas, como puede ser observado en la base de datos Madrigal.

6. Conclusiones

Se logró realizar la remoción de cabezas de meteoros por medio de un filtro espacial, sin recurrir al cálculo de correlaciones cruzadas, lo que es adecuado para el uso independiente de los canales.

5. Discusión

El valor umbral de SNR o nivel de potencia para la generación de la imagen binaria debe ser establecido para cada experimento, pues depende del número de baudios del pulso transmitido y el código utilizado. Asimismo, los tamaños del filtro espacial y el del elemento estructurante usado en la validación de colas deben ser definidos óptimamente según sea el experimento.

Los resultados obtenidos para la velocidad del viento son cercanos a los obtenidos por otras técnicas, como puede ser observado en la base de datos Madrigal.

6. Conclusiones

Se logró realizar la remoción de cabezas de meteoros por medio de un filtro espacial, sin recurrir al cálculo de correlaciones cruzadas, lo que es adecuado para el uso independiente de los canales.

Para evitar el recurrente procesamiento de los datos crudos se realizó la escritura de la información relevante de los datos procesados en archivos hdf5. Se implementó un programa fuera de las librerías de Signal Chain para la lectura de los archivos hdf5 anteriores, la reconstrucción de los bloques de datos completos a partir de ellos y su procesamiento para la obtención de la velocidad del viento.

Los resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud que los obtenidos por otros métodos.

7. Recomendaciones

El trabajo realizado es válido solo para los intervalos de tiempo en los que el EEJ no está presente. Se intentó realizar su remoción utilizando el ancho espectral, pero ello no fue satisfactorio. Se recomienda realizar un estudio de las características físicas del EEJ a fin de poder encontrar un parámetro que lo diferencie de las colas de meteoros. Este procedimiento sería fácilmente acoplable a los procedimientos expuestos.

A fin de guardar un mejor orden, se recomienda implementar las rutinas escritas para lectura de archivos hdf5 y procesamiento para cálculo de vientos en las librerías de Signal Chain.

8. Bibliografía

Oppenheim, M. M., Sugar, G., Slowey, N. O., Bass, E., Chau, J. L. & Close, S. (2009, Mayo). Remote sensing lower thermosphere wind profiles using non-specular meteor echoes. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L09817, doi: 10.1029/2009GL037353.

Sugar, G., Oppenheim, M. M., Bass, E. & Chau, J. L. (2010, Diciembre). Nonspecular meteor trail altitude distributions and durations observed by a 50 MHz high-power radar. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, A12334, doi: 10.1029/2010JA015705.

Oppenheim, M. M., Arredondo, S. & Sugar, G. (2014, Enero). Intense winds and shears in the equatorial lower thermosphere measured by high-resolution non-specular meteor radar. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, doi: 10.1002/2013JA019272.

Chapin, E. & Kudeki, E. (1994). Radar interferometric imaging studies of long-duration meteor echoes observed at Jicamarca. *Journal of Geophysical Research*, 99 (A5), doi: 10.1029/93JA03198.

Hildebrand, P. y Sekhon, R. (1974). Objective Determination of the Noise Level in Doppler Spectra. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 13, pp: 808-811.

Galindo, F. R. (2007). Caracterización de meteoros, utilizando el radar VHF del Radio Observatorio de Jicamarca durante la presencia de ecos coherentes de Electrochorro Ecuatorial. Tesis para optar el título de Ingeniero Físico. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Chahuara, H. y Scipión, D. (2015). Discriminación de cabeza y cola en datos de meteoros de alta potencia obtenidos en el radar de Jicamarca. *Compendio de estudiantes 2015*, IGP.

Suárez, D. (2013). *Signal Chain*.

IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE FORMACIÓN DE IMÁGENES EN 2D y 3D USANDO UN RADAR DE APERTURA SINTÉTICA TERRESTRE

IMPLEMENTATION OF ALGORITHMS FOR 2D AND 3D GROUND BASED SYNTHETIC APERTURE RADAR (GB-SAR) IMAGING.

Luis Saul Charapaqui Miranda

Universidad San Martín de Porres
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
saul.charapaqui@gmail.com

Asesor: Marco Milla, Ph. D.

Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

Este proyecto de investigación y desarrollo tecnológico, llamado “Sistema remoto de monitoreo y alerta temprana de deslizamientos de grandes masas de tierra” propuesto por el Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), nace de la necesidad de los Geólogos por utilizar herramientas de monitoreo de deslizamientos más efectivas, seguras y eficientes en comparación a las herramientas tradicionales. Deslizamientos de grandes masas de tierra son fenómenos naturales que pueden ocurrir lentamente en el transcurso del tiempo; sin embargo, se debe tener conocimiento de su evolución para prevenir y salvaguardar los bienes materiales y humanos de la zona en peligro. Es por ello, que se necesita una herramienta con las características de ser: portable, que sea capaz de monitorear varios puntos en una zona determinada, monitoreo constante (día y noche), y sea remoto para resguardar la seguridad de los trabajadores que realizan esta labor. El presente trabajo de tesis es una consecuencia de este proyecto donde se explicaran ventajas y desventajas del sistema, características del sistema y limitaciones, el algoritmo implementado, primeros resultados y conclusiones.

Palabras clave: monitoreo de deslizamientos, rangedoppleralgorithm, radar de apertura sintética.

Abstract

This research and technological development project, called “Sistema remoto de monitoreo y alerta temprana de deslizamientos de grandes masas de tierra” conducted by the Jicamarca Radio Observatory (JRO), was motivated by the needs of Geologists to use better, effective, and safer landslide monitoring tools than traditional monitoring techniques. Landslides caused by large mass movements are natural phenomena that may occur slowly over time, thus, it is important to monitor their evolution to prevent and safe material and human resources. Because of that, it is needed to develop a tool with characteristics like the following: portable, be able to manage several monitoring points over a desired zone, 24/7 monitoring capability, and remote system to secure the safety of the people who operates these instruments. The present thesis is a consequence of this project, in this work we will explain in detail the upsides and downsides of the system, the characteristics of the system and its limitations, the algorithms implemented, the initial results and some conclusions.

Keywords: landslides monitoring, range doppler algorithm, synthetic aperture radar (sar)

1. Introducción

El Perú presenta una de las geografías más diversas, tanto natural como social, en Sudamérica. Como resultado de la creciente desigualdad económica en las últimas décadas, el aumento poblacional descontrolado y la falta de una política de prevención, existen personas, familias viviendo cerca de la base de laderas o cerros, poniendo su vida en riesgo debido a la posibilidad de peligros naturales como deslizamientos o huaycos. En las siguientes subsecciones, se realizará una pequeña introducción a los deslizamientos y la diferencia entre estos y los huaycos, así como algunas de las técnicas tradicionales empleadas para estudiar estos fenómenos naturales.

1.1. Deslizamientos

Los deslizamientos pueden ser definidos como un fenómeno geológico de lentos movimientos de grandes masas de tierra a través de la zona superficial ("titled zone") de una ladera. Una manera de identificar un posible deslizamiento de masa sería la presencia de escalones ("scarps") en la parte superior de una ladera, además, de una pila de escombros ("debris pile") formado por material natural de piedras, tierra, vegetación, etc., depositado en la parte baja de la ladera. Ver figura 1.

Los deslizamientos son causados por diversas razones como actividades sísmicas, composición de tierra, factor humano o humedad y lluvia, este último en pequeña escala. La diferencia con el otro fenómeno conocido como huayco es debido a su origen, ya que el huayco es causado mayormente por el factor agua. Un huayco es una gran masa de agua y detritos que baja violentamente de una montaña o una ladera a través de un canal. Entre los deslizamientos mas notables que han ocurrido en el Perú tenemos el de Mayunmarca, Huancavelica que afecto muchas viviendas familiares, así como uno en la montaña de Condor-Sencca en un intervalo de tiempo desde Agosto a Octubre de 1945. Más información acerca de estos eventos y otros deslizamientos pueden ser encontrados en [1].

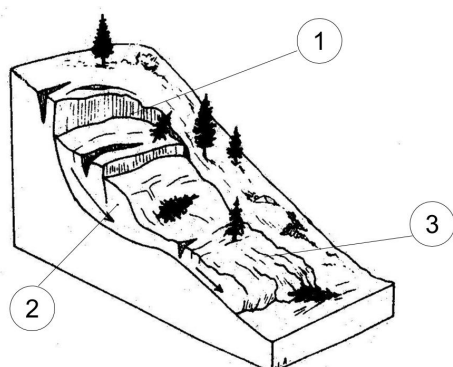


Figura 1. Las zonas más representativas de un típico deslizamiento: (1) Escalones, (2) zona superficial y (3) pila de escombros. Adaptado de [2].

Técnicas de monitoreo de deslizamientos

Algunas de las técnicas tradicionales para el monitoreo de deslizamientos incluyen el uso de instrumentos como inclinómetros, lasers, o Ground Position System (GPS). Una característica común de estos, es el hecho que cada sistema es utilizado colocando los sensores localmente encima de la zona superficial de la ladera (titled zone). Como un ejemplo, si uno quisiera usar mediciones con láser del desplazamiento de la tierra, la cantidad de postas que deberían ser puestas encima de una área de 2 kilómetros cuadrados para conseguir resoluciones de 20 metros, se tendría alrededor de cientos o miles de unidades. Por lo tanto, este tipo de trabajo sería considerado duro y riesgoso [3].

Otra técnica, sugiere usar una gran cantidad de imágenes satelitales del área de interés para procesar los desplazamientos en cada pixel. Una obvia limitación de este sistema, sería su dependencia de las condiciones meteorológicas, ya que se requiere de contar con el cielo despejado encima del área de interés. Finalmente, se tienen otras tecnologías que se conforman de la operación de radares, principalmente divididos en 2 categorías: Radares de Apertura Sintética Aéreos y Terrestres (GB-SAR). El modo de operación de la primera tecnología es montada en aviones o satélites, mientras que el ultimo usa un sistema lineal de posicionamiento terrestre que permite la capacidad de un monitoreo constante [3].

En este caso de estudio, GB-SAR fue escogido como sistema de monitoreo de deslizamientos debido a sus facilidades y operación de continuo monitoreo. Sistema de Radar

Brevemente, se explicará la teoría fundamental de un sistema de radar. Un sistema de radar trabaja generando y transmitiendo ondas electromagnéticas a un objetivo específico. El objetivo refleja estas ondas y una fracción de la señal viaja de regreso al radar con menor potencia y un desfase, esta señal reflejada pueden ser detectada y procesada. Los sistemas de radar han sido desarrollados por muchas décadas en los campos de detección de rango, cálculo de velocidad, etc. Sin embargo, cuando se busca sobretemas relacionados a la formación de imágenes por radar, que debería conseguir buenas resoluciones en rango (range) y en la dirección perpendicular (cross-range), podemos encontrar que la resolución en la dirección perpendicular al rango presenta problemas de baja resolución debido a que depende del tamaño físico de las antenas utilizadas. La resolución es definida como la distancia de 2 objetos que pueden ser resueltos o determinados sin ambigüedad.

Resolución en rango

Altas resoluciones en rango (R) pueden ser conseguidas reduciendo la duración de la señal o

incrementando su ancho de banda. Sin embargo, si la duración de la señal disminuye, la variable Signal to Noise Ratio (SNR) será afectada negativamente. Es importante mencionar que nuestro sistema trabaja y el análisis se hará en el dominio de la frecuencia. Para este propósito, la mejor opción es la de transmitir una señal escalonada lineal modulada en frecuencia (técnica llamada compresión de pulso) para expandir su ancho de banda (B). Esta señal escalonada es también llamada chirp [5].

Según la ecuación siguiente, la resolución de rango (ΔR) depende de la velocidad de la luz (c), y es inversamente proporcional al ancho de banda de la señal transmitida (B).

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (1)$$

2.2. Resolución en azimuth

El azimuth o rango perpendicular (x), es la dirección perpendicular a la línea de vista del radar al objeto. La ecuación (2), muestra que el ancho del haz de la antena (θ) inversamente depende del tamaño de la antena (l).

$$\theta = \frac{\lambda}{l} \quad (2)$$

donde λ es la longitud de onda de la señal. La resolución en azimuth Δx sería,

$$\Delta x = R\theta = R \frac{\lambda}{l} \quad (3)$$

donde R representa el rango.

Para obtener una mayor resolución en azimuth, es que se puede implementar un Radar de Apertura Sintética [7].

2.3. Principio del Radar de Apertura Sintética

Se usará el tipo de Radar de Apertura Sintética Terrestre. Se opera moviendo un par de antenas a través de un camino lineal en intervalos regulares. Haciendo esto, se sintetiza una antena mucho más grande, como en la figura 2.

$$\Delta x = R\theta = R \frac{\lambda}{2L_s} \quad (4)$$

La ecuación (4) muestra la mejora de resolución en rango. Una explicación más profunda puede ser encontrada en [6].

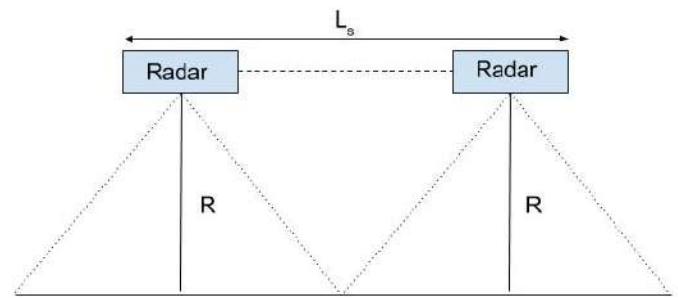


Figura 2. Operación de un Radar de Apertura Sintética. Donde R es la distancia al objeto y L_s es la distancia del camino [5].

2.4. Diagrama de bloques

Se puede observar en la figura (3), las partes conformadas de un sistema GB-SAR. Se tiene la plataforma lineal montada con un radar quasi mono estático, y un computador para la adquisición de datos y el control de posicionamiento.

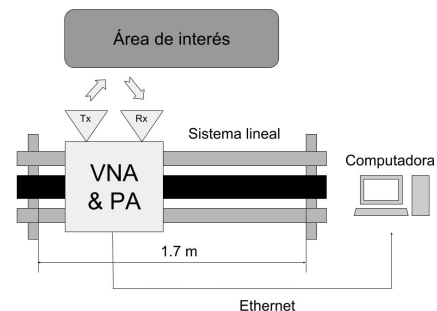


Figura 3. Diagrama de bloques SAR [9], incluye partes mecánica y electrónica

GB-SAR de Jicamarca

Considerando las ventajas ya explicadas, un GB-SAR (en la banda Ku) se encuentra bajo desarrollo en el ROJ. Un primer prototipo está actualmente implementado y nos permite realizar los primeros experimentos para formar primeras imágenes, y comparar las resoluciones teóricas con los experimentales.

Hardware

Según lo observado en la figura 3, el sistema está compuesto de las siguientes partes mecánicas: un posicionador lineal, que consiste en una faja de 1.7 metros de distancia para lograr el movimiento de las antenas y generar la apertura sintética y un motor a pasos, que provee el movimiento a la faja. Además, se tienen las siguientes partes electrónicas: el Analizador Vectorial de Redes (VNA), que es parte fundamental del radar porque permite generar y adquirir las señales reflejadas por el objetivo, un amplificador de potencia, que incrementará el rango de alcance del radar, y las antenas tipo horn, que permiten radiar las señales de radiofrecuencia al área de observación.

Algoritmo implementado

El algoritmo utiliza el principio de interferometría para este propósito. Como se explica en [9], la

interferometría consiste en procesar los valores complejos de una imagen de radar desde diferentes puntos de vista. Los sistemas de transmisión y recepción, formados por el VNA y las antenas, nos permiten obtener el parámetro S_{21} que puede ser interpretado como el campo eléctrico $E_{-}(i,k)$ reflejado por la escena, siendo i el índice de la frecuencia usada en transmisión y k el índice de la posición k -ésima en el riel.

Para obtener una imagen compleja I_n de n puntos, los valores complejos de todas las señales medidas tienen que ser sumadas considerando su historial de fase. Este procedimiento puede ser realizado implementando las siguientes ecuaciones:

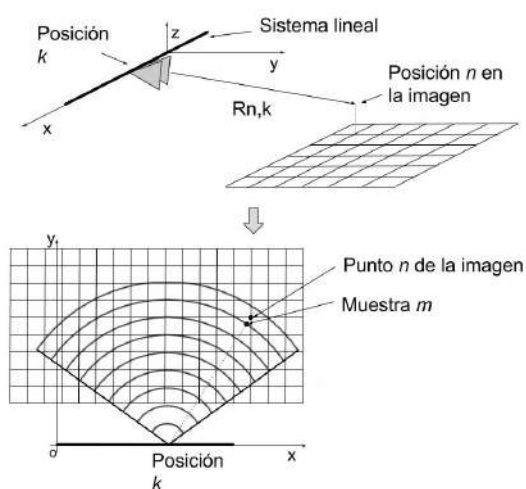


Figura 4. Superior: antenas escaneando el área de interés, en cada posición k para formar la imagen I_n de n puntos. Inferior: El principio del algoritmo, consistiendo en la aproximación de cada una de las muestras para cada frecuencia a los puntos de la grilla [9].

Donde:

- n_f : Número de frecuencias del VNA.
- n_p : Número de posiciones en el riel.
- f_i : Valor de cada frecuencia
- c : La velocidad de la luz
- $R_{n,k}$: Distancia entre un punto n y la posición k del riel.

R_0 : una constante representando el retraso introducido por los cables de la antena.

Por último, la evaluación del algoritmo depende del número de posiciones y frecuencias del experimento. Pero, la formación de imágenes es determinada por la geometría asumida por la escena a ser reconstruida, y debería considerar la resolución del sistema de acuerdo a las ecuaciones (1) y (3). La implementación del algoritmo es simple, pero dependiendo de la resolución que se quiera obtener puede tener un alto costo computacional. La ecuación (6) puede ser evaluada utilizando la IFFT (InverseFast Fourier Transform) para cada una de las frecuencias medidas, y se repite para cada una de las posiciones del radar, como se ve en la figura 4. Esto brinda el valor de las señales en un cierto radio partiendo desde la posición del radar, que es la muestra m de la medición. El punto n de la escena será aproximado a la muestra m más cercana, multiplicándolo por la distancia $R_{n,k}$ entre el punto y la posición k , repitiendo este proceso para cada una de las posiciones. El algoritmo fue implementado en Python v2.7.6, utilizando las funciones de IFFT e interpolación de las librerías Numpy, con la interpolación se obtiene resultados con una mejor resolución.



Figura 5. Primer prototipo GB-SAR desarrollado: (1) sistema de antenas, (2) Analizador vectorial de Redes (VNA), (3) Posicionador Lineal, (4) Motor paso a paso y (5) Driver del motor.

4. Resultados

Los primeros experimentos para probar el algoritmo fueron realizados utilizando los parámetros de la tabla 1. El objetivo de estos experimentos fue de comparar y revisar las resoluciones obtenidas. El sistema es temporalmente instalado en un sitio remoto del ROJ para evitar parcialmente reflexiones externas. Dos cubos de aluminio (20 cm por lado) fueron usados como objetivos para probar la resolución en rango y azimut.

Potencia Transmitida (P_0)	-3 dBm
Ganancia de la antena (G)	15 dB
Frecuencia Central (f_c)	16 Ghz
Rango de frecuencias ($f_i - f_f$)	[15.5-16.5] Ghz
Ancho de Banda (B)	1 Ghz
Número de frecuencias (N_f)	4001
Distancia del riel (L)	0.75 m
Numero de posiciones (N_p)	75
Altura del radar sobre la escena (h)	1.24 m
3dB Ancho del haz @16Ghz	28.17°

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Como se observa en la tabla 1, la altura del radar a la escena es pequeña y las antenas apuntan paralelamente al plano del piso. Considerando esto, y siendo 28.17° el ancho del haz de la antena [8], una distancia crítica desde donde una imagen puede ser formada se tiene que tomar en cuenta. Determinada calcula determina una distancia de 4.94 metros (m); por lo tanto, los bloques fueron colocados a una distancia de 9.6 m y 9.28 m respectivamente, y una separación entre ellos de 0.12 m en azimut, 0.15 m en rango y 0.45 m de distancia entre el centro de cada uno. Como se puede observar en la figura (6). Según la ecuación (1), la resolución en rango sería de 0.15 m y según la ecuación (4) la resolución en azimut a una distancia de 9.6 m sería de 0.12 m. Los bloques usados para estos experimentos tienen dimensiones cercanas a ambas resoluciones (20 cm). Por esta razón, y considerando que estos presentan esquinas finas, los bordes no pueden ser resueltos adecuadamente. Por lo tanto como los objetos tienen dimensiones cercanas a la resolución del sistema, efectos de eco llamados artifacts aparecen, como se ve en la figura 7.

Estos artifacts son producidos por una función sinc que es generado cuando el VNA está adquiriendo las señales adquiridas [4], porque la cantidad de muestras es finita, por lo tanto la señal adquirida en frecuencia está truncada.

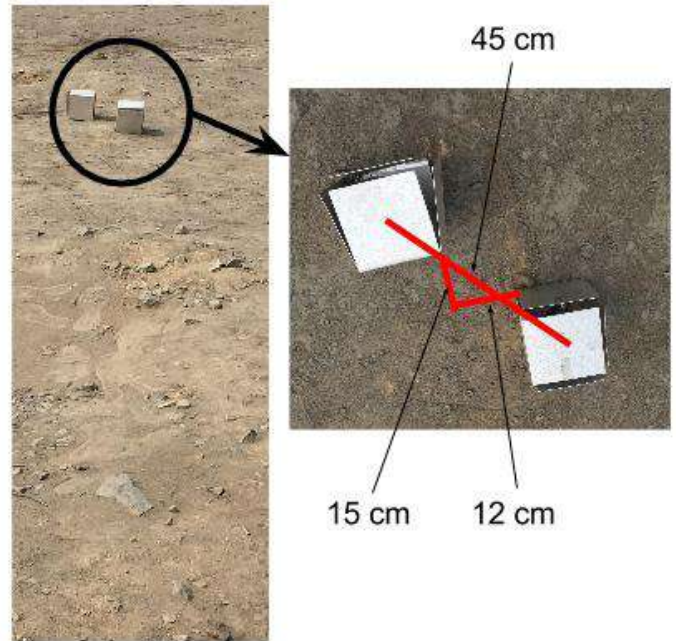


Figura 6. Vista de los objetivos, ubicados en 9.6 m y 9.8 m respectivamente.

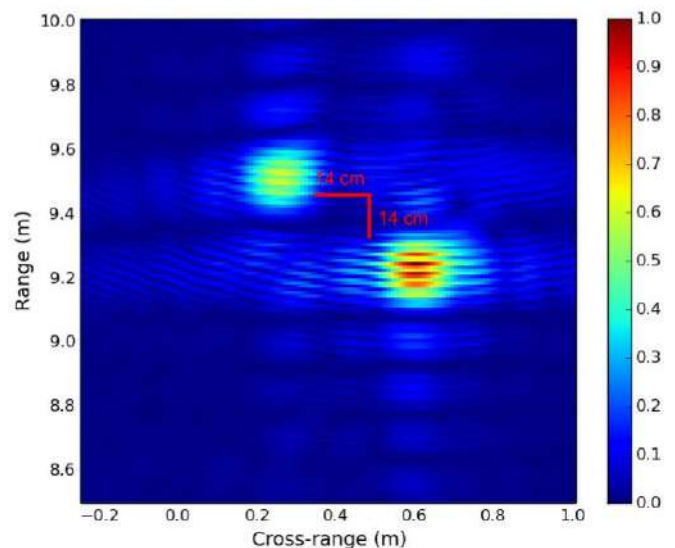


Figura 7. Imagen resultante. Los 2 objetos son resueltos y pueden ser distinguidos del fondo porque estos tienen mayor potencia relativa que el fondo de la escena. La escala de colores está normalizada.

5. Conclusiones

Los resultados de la formación de imágenes nos muestran las capacidades para detectar objetos de una misma escena, y la comparación de las resoluciones teóricas (con algún error) en ambas coordenadas. Sin embargo, la imagen no puede mostrar detalles y presenta problemas de ecos, explicados en la sección anterior.

De hecho, las antenas del radar se encuentran fijadas a la estructura y no es posible cambiar su ángulo con respecto al piso. Se realizaron los cambios en la estructura para mejorar este problema. Estos

resultados preliminares nos servirán para ganar conocimiento en el proceso de formación de imágenes de radar, así como las implicaciones y limitaciones presentes.

Para continuar con el desarrollo del proyecto, se implementará una técnica de monitoreo de deslizamientos que utilizará, las imágenes en 2D generadas y la teoría de interferometría. Se debe realizar algunas mejoras en la estructura para que las antenas ganen una altura determinada y poder obtener información de la coordenada altura, y así formar imágenes en 3D [3].

6. Agradecimientos

Un especial agradecimiento al área de CIELO (Cluster of Instruments for Equatorial & Low-Latitude Observations) del ROJ por su apoyo técnico, a M.Sc. Juan Carlos Gómez por su apoyo de conocimientos en geofísica, y al Ph.D. Danny Scipión por sus sugerencias.

7. Bibliografía

L. Chang Chang and J. E. Alva, *Deslizamientos y aluviones en el Perú*. Lima, Perú: UNI – CISMID, 1991

California Department of Conservation, *Types of landslides* [Online]
Available at www.conservation.ca.gov/cgs/geologic_hazards/landslides/Pages/LandslideTypes.aspx

J.C. Gómez MSc., *Personal communication* Lima, Perú: Instituto Geofísico del Perú. 15 de Marzo de 2016.

Marco Milla PhD., *Personal communication* Lima, Perú: Radio Observatorio de Jicamarca, 21 de Abril del 2016.

M. Sensat, *Formacion de imágenes de radar de apertura sintetica (SAR) de precisión mediante técnicas de retroproyección* Barcelona, España: UPC, 2015.

M. Skolnik, *Radar handbook* New York, United States: McGraw-Hill, 2008.

C. Jackson. *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*. United States, 2004.

A-Info company, *LB-62-15, 12.4 - 18.0 GHz Standard Gain Horn Antenna* [Online] Available at [www.ainfoinc.com/en/pro_pdf/newproducts/antenna/Standard%20Gain%20Horn%20Antenna/tr LB-62-15.pdf](http://www.ainfoinc.com/en/pro_pdf/newproducts/antenna/Standard%20Gain%20Horn%20Antenna/tr%20LB-62-15.pdf).

M. Pieraccini. G, Luzi, C Atenzi. *Terrain Mapping by Ground-Based Interferometric Radar*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no, 10, pp. 2176-2181, Oct 2001.

IMPLEMENTACIÓN DE SPACED ANTENNA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA PARA ESTIMACIÓN DE VIENTOS TROPOSFÉRICOS

IMPLEMENTATION OF SPACED ANTENNA TECHNIQUE IN THE FREQUENCY DOMAIN FOR TROPOSPHERIC WINDS ESTIMATION

Víctor Eduardo Vásquez Ortiz
Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
victor.vasquez@jro.igp.gob.pe

Asesor: Danny Scipión, Ph. D.
Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

En el presente trabajo se explicará detalladamente la implementación de la técnica Spaced Antenna en el dominio de la frecuencia para la estimación de los vientos en el software Signal Chain, que usa autoespectros y espectros cruzados de las señales de radar recibidas.

Se llevó esta tarea en base a dos enfoques: uno planteado en [Briggs y Vincent 1992], que emplea ajustes gaussianos a la magnitud de los autoespectros y espectros cruzados y ajustes lineales a las fases de los espectros cruzados para obtener los parámetros necesarios para seguir la solución matemática propuesta en [Briggs 1984]; y el otro planteado en [Holloway 1997] que estima los vientos en la línea base correspondiente usando solo dos receptores.

Los vientos obtenidos usando el método de [Briggs y Vincent 1992] están de acuerdo con el trabajo previo de [Oscanoa 2014]. Sin embargo, los vientos obtenidos por [Holloway 1997], a pesar de ser ruidosos siguieron el mismo patrón de dirección de las otras implementaciones. Debido a problemas de ecos de tierra, vientos razonables se obtuvieron entre 4 km y 10 km donde la fase del espectro cruzado era lineal.

Palabras clave: spaced antenna; FSA; análisis espectral; estimación de vientos.

Abstract

In this work it will be explained in detail the implementation of the Spaced Antenna technique in the frequency domain for wind estimation in the Signal Chain environment, which uses the self- and cross-spectra of the received radar signals.

The assigned tasks were implemented following two approaches: one proposed by [Briggs y Vincent 1992], that uses Gaussian fittings for the module of the self- and cross-spectra and linear fittings for the phase of the cross-spectra to obtain the corresponding parameters needed to find the mathematical solution presented in [Briggs 1984]; and the other one proposed by [Holloway 1997] that estimates the winds in the corresponding baseline by using only two receivers.

The obtained winds using [Briggs y Vincent 1992] method are in good agreement with the previous work by [Oscanoa 2014]. On the other hand, the winds obtained through [Holloway 1997], though being too noisy, they followed the same direction of the other implementations. Due to ground-clutter problems, reasonable winds were obtained only between 4 km and 10 km where the cross-spectra phase was linear.

Keywords: spaced antenna; FSA; spectral analysis; wind estimation.

1. Introducción

Desde su creación, el Radio Observatorio de Jicamarca ha estado a la vanguardia en los estudios sobre la atmósfera, contando con una ubicación única, al estar situado en el ecuador magnético, y con el radar más grande y potente del mundo. A lo largo de los años se han utilizado los datos obtenidos por este radar de dispersión incoherente en la observación de diversos fenómenos atmosféricos, por ejemplo: EEJ, ESF, meteoros, drifts, etc. Adicionalmente por ser un radar MST también es usado para estudios de la mesósfera, estratósfera y tropósfera.

Mediante el uso del software Signal Chain, escrito en Python y desarrollado en este centro de investigación, se han implementado las rutinas de programación basadas en las técnicas Doppler Beam Swinging (DBS) y Spaced Antenna (SA) que sirven para calcular las componentes zonal, meridional y vertical de los vientos de la atmósfera neutra.

En el marco de la investigación en el Perú, “Innovate Perú” está financiando al ROJ para la construcción de un Radar UHF que operará a 445 MHz, a esta frecuencia el radar además de captar los ecos de aire claro detectará ecos de precipitaciones. Adicionalmente, los haz de la antena de recepción apuntarán de manera vertical lo que hace necesaria la implementación de la técnica de SA para la estimación de vientos. La discriminación de ambos ecos se realizará a través del análisis espectral de las señales, y los provenientes de aire claro serán utilizados para la estimación de vientos empleando SA en el dominio de la frecuencia.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Implementar la técnica “Spaced Antenna” en el dominio de la frecuencia para la estimación de vientos troposféricos.

1.1.2. Objetivos Específicos

Crear una rutina de Operacion en la Unidad de Procesos Spectra de Signal Chain para determinar los parámetros según [Briggs y Vincent 1992].

Crear una rutina de Operacion en la Unidad de Procesos Parameters de Signal Chain para aplicar la técnica spaced antenna en el dominio de la frecuencia según [Briggs y Vincent 1992].

Crear una rutina de Operacion en la Unidad de Procesos Parameters de Signal Chain para aplicar la técnica spaced antenna en el dominio de

la frecuencia según [Holloway 1997].

Crear dos scripts para Signal Chain que calculen la velocidad de los vientos tropos- féricos según los autores mencionados.

1.2. Marco teórico

Al ser el tema de análisis de correlaciones y espectros simple pero extenso se sugiere al lector revisar las referencias bibliográficas. Pues no es la intención de este trabajo transcribir estos estudios previos.

Se implementaron dos enfoques distintos para hallar la componente horizontal de los vientos, los cuales serán explicados brevemente a continuación.

1.2.1 Método desarrollado por [Briggs y Vincent 1992]

En este método se señala que los coeficientes de los elipsoides necesitados por el método de [Briggs 1984], en vez de ser obtenidos mediante análisis de correlaciones pueden ser hallados en base a sus respectivas características observadas en el espectro, de la siguiente manera:

$$W_{ij} = \left(\frac{\pi}{C}\right)^{1/2} \exp - \left[A\xi_{ij}^2 + B\eta_{ij}^2 + 2H\xi_{ij}\eta_{ij} - \frac{(F\xi_{ij} + G\eta_{ij})^2}{C} \right]$$

$$f_{ij} = \frac{C^{1/2}}{\pi}$$

$$m_{ij} = -2\pi \left[\frac{F\xi_{ij}}{C} + \frac{G\eta_{ij}}{C} \right]$$

donde W_{ij} , f_{ij} y m_{ij} pueden ser hallados de los espectros normalizados en base a ajustes de una gaussiana al valor absoluto de la magnitud y una línea recta a la fase, tal como se muestra en la Figura 1. ξ_{ij} y η_{ij} representan la distancia entre los pares de antenas.

Finalmente con los coeficientes encontrados se puede continuar con las ecuaciones sustentadas en [Briggs 1984]:

$$AV_x + HV_y = -F$$

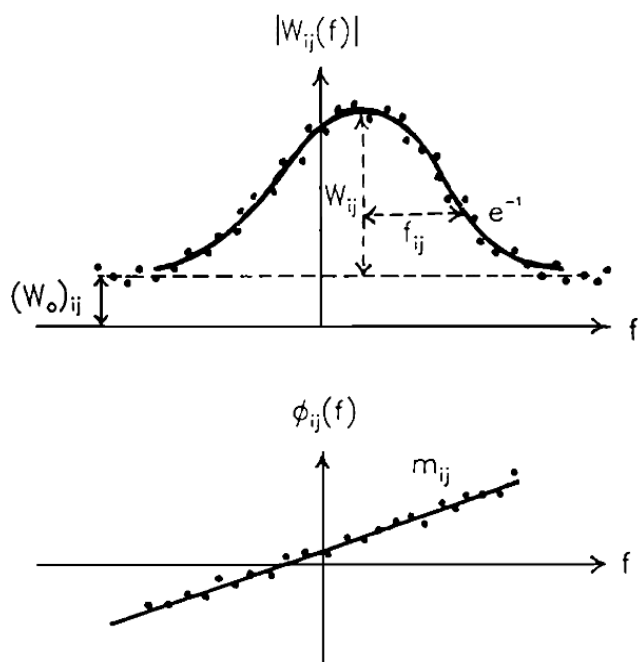


Figura 1: Ajustes para calcular los parámetros necesarios por [Briggs y Vincent 1992].

donde V_x y V_y representan las componentes horizontales de la velocidad aparente (V_a que es captada por los receptores, ya que el análisis de [Briggs 1984] es para patrones en movimiento sobre tierra. Para esto se considera el point-source effect ([Briggs 1980]) el cual indica que:

$$V_a = V_t / 2$$

donde V_t es la velocidad real de los vientos y V_a la captada en tierra por los sensores, en este caso antenas.

1.2.2. Método desarrollado por [Holloway 1997]

Este trabajo se basa en los estudios de [Doviak 1996], es más directo que el anterior ya que solo necesita dos antenas para calcular la velocidad del viento en la dirección de estas, implicando esto el cálculo de menos parámetros. La fórmula obtenida en este trabajo fue la siguiente:

$$v_{ox} = \frac{S_{\phi} \sigma_v^2}{c_o}$$

donde S_{ϕ} representa la pendiente de la fase del espectro cruzado y σ el ancho espectral de la magnitud de este. Siendo c_o :

$$c_o = \frac{\beta_h^2 \lambda \Delta x}{4\pi}$$

donde Δx es la distancia entre antenas, λ depende de la frecuencia del radar y β_h , que está relacionado con la escala de longitud del patrón de difracción es:

$$\beta_h = \frac{1}{2} \left[2S_{\phi}^2 \sigma_v^2 - 4 \ln \frac{|s_{12}(\text{peak})|}{|s_{11}(\text{peak})|} \right]$$

donde $s_{11}(\text{peak})$ y $s_{12}(\text{peak})$ son el valor máximo del autoespectro y espectro cruzado respectivamente.

2. Desarrollo

2.1. Materiales

Datos obtenidos en Febrero del 2014 durante una campaña diseñada específicamente para la validación de las distintas técnicas de estimación de vientos.

Datos sobre las características del experimento, encontradas en [Manual de experimento].

El lenguaje Python que es utilizado por Signal Chain. Usado en el ROJ debido a ser un lenguaje de alto nivel fácil de entender y usar.

El software Eclipse, como plataforma para correr Signal Chain. Elegido por su facilidad para manejar archivos de repositorios, y su interfaz que presenta muchas herramientas útiles para tareas de programación.

Se trabajó sobre el sistema operativo Ubuntu 14.04, por su gran compatibilidad y versatilidad al trabajar con Python y sus librerías.

2.2. Implementación

A continuación mencionaremos las modificaciones hechas en los scripts de Signal Chain.

2.2.1. jrodata

Script encargado de inicializar, parametrizar y caracterizar los tipos de datos utilizados en Signal Chain.

Clase «Spectra»:

Método getFreqDelta: retorna el delta del vector frecuencia.

Método getVelDelta: retorna el delta del vector velocidad.

2.2.2. jroproc_spectra

Script encargado de realizar automáticamente todas las operaciones para obtener las señales en el dominio de la frecuencia, adicionalmente cuenta con operaciones para optimizar los datos obtenidos.

Función gaussian: retorna una gaussiana en base a un vector y 4 parámetros.

Función reverseGaussian: retorna la componente ordenada de una curva gaussiana.

Función straightLine: retorna una línea recta en base a un vector y 3 parámetros.

Función findNearest: retorna el índice de un vector con el valor más cercano al solicitado.

Función movePhase: función usada para redefinir el rango en el que se expresa la fase.

Función fitgaussianAndStraightLine: función que hace ajustes de gaussiana y línea a la magnitud y fase del espectro para retornar los 4 parámetros necesarios por [Briggs y Vincent 1992]. Los ajustes se pueden ver en la Figura 2

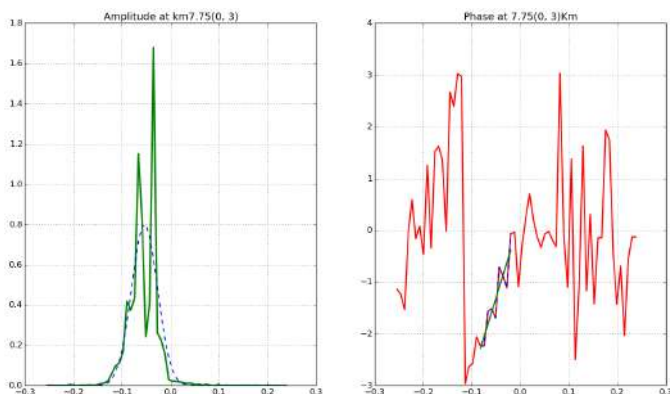


Figura 2. Ajuste gaussiano a la magnitud del espectro y ajuste lineal a la fase.

Clase «SpectraProc»:

Método curveFitParameters: Es la operación que se encarga de realizar el siguiente proceso: obtener los espectros y espectros cruzados a procesar, cálculo de los parámetros mediante la función fitgaussianAndStraightLine, y asignación de estos al atributo dataOut.curveParameters.

2.2.3. jroproc_parameters

Script encargado de aplicar métodos y técnicas a los datos de entrada para completar los procesos específicos solicitados.

Función fitGaussian: función que realiza un ajuste gaussiano a un vector que contiene la magnitud, basado en otro vector que contiene las coordenadas abscisas.

Función calculateMoments: copia exacta de __calculateMoments de la clase ParameterProc, usada para obtener los momentos del promedio de los autoespectros.

Clase «ParametersProc»:

Método run: encargado de asignar los valores de los datos de entrada a los atributos propios de su clase.

Método __calculateMoments: solamente se agregó un ajuste gaussiano al espectro para evitar interferencias.

Clase «WindProfiler»:

Método __findC: retorna el parámetro “C” necesario para [Briggs 1984], basado en el ancho e-1 del promedio de los autoespectros.

Método __findFG: retorna los parámetros “F” y “G” necesarios para [Briggs 1984], basado en las pendientes de las fases de los espectros cruzados y la distancia entre los pares de antenas.

Método __findABH: retorna los parámetros “A”, “B” y “H” necesarios para [Briggs 1984], basado en los valores máximos de la magnitud de los espectros cruzados y la distancia entre los pares de antenas.

Método __BriggsVincent2: implementa el método de [Briggs 1984] basado en los coeficientes hallados con anterioridad. Retorna las componentes del viento horizontal.

Método __BriggsVincent: Igual que el método anterior pero utiliza el método “numpy.linalg.solve”.

Método __DoviakHolloway: implementa el método [Holloway 1997], toma los parámetros necesarios hallados previamente y retorna la velocidad del viento entre un par de antenas.

Método __rotateVelocities: toma dos vectores y un Angulo y devuelve los vectores rotados.

Método run: se agregó la elección de la nueva técnica SAFD, en la que primero se selecciona el autor del cual se quiere implementar el método. Posteriormente se hallan y llaman los parámetros necesarios para implementar el método seleccionado. Luego se halla la velocidad vertical en base a la velocidad radial. Al final se asignan las componentes tridimensionales de las velocidades al atributo dataOut.data_output para su posterior utilización por la operación «WindProfilerPlot».

2.3. Experimento

Para evaluar nuestras rutinas ejecutamos dos experimentos por medio de dos scripts en Signal Chain. Las características del experimento se muestran en la Figura 3 y la Tabla 1.

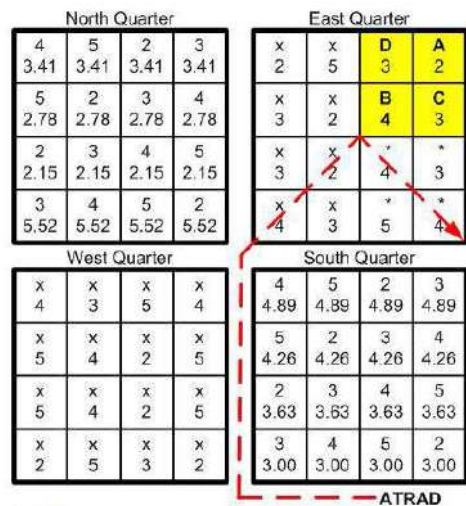


Figura 3: Configuración de la antena para el experimento.

Tabla 1. Resumen del experimento Spaced Antenna.

Parámetros Experimento SA	Valor
IPP	250 km
Potencia de Tx	10 kW
Sistema de adquisición	JARS2
Tipo de dato	rawdata
Nº perfiles/bloque	1024
Nº bloques/archivo	80
Antena Tx	Eu11, Eu12, Eu15, Eu16
Antena Rx	A, B, C, D

Específicamente utilizaremos los autoespectros y los espectros cruzados que se aprecian en la Figura 4. Un ejemplo de los datos que se analizarán se presenta en la Figura 5.

Los parámetros de procesamiento usados para ejecutar los scripts son descritos en la Tabla 2.

El ángulo de desviación respecto a los ejes cardinales es de 51.06 antihorario, y la distancia entre los módulos de las antenas es de 36 m

para módulos contiguos y 50 m para módulos en diagonal. Los cuales se obtuvieron de [Chau 1998].

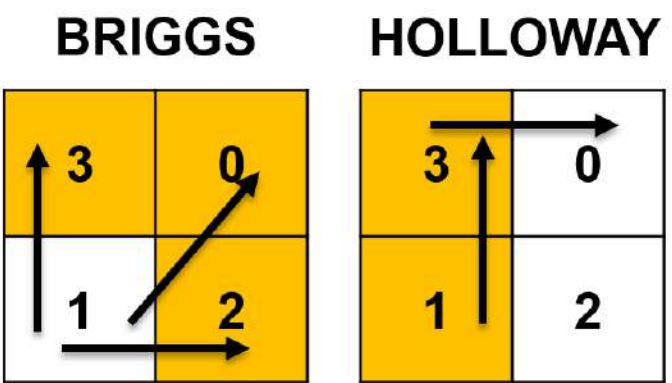


Figura 4: En naranja los canales de los que se obtienen los autoespectros, las flechas indican la dirección en la que se toman los espectros cruzados.

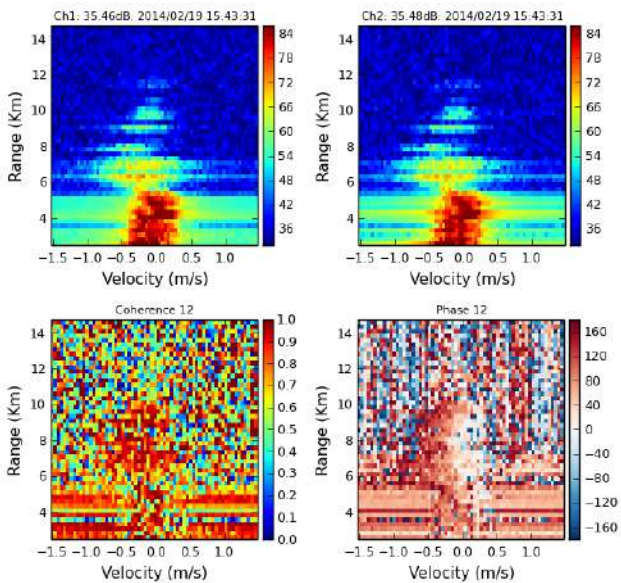


Figura 5: Arriba: Potencia de los espectros de los canales 1 y 2. Abajo: Coherencia a la izquierda, fase a la derecha.

Tabla 2. Parámetros de procesamiento de datos.

Parámetros de procesamiento	Valor
Frecuencia Radar	49.92 MHz
Nº Integraciones Coherentes	600
Nº Integraciones Incoherentes	3
Nº puntos fft	64
Resolución alturas	250 m
Rango de alturas	2.5 – 14.75 km

Los procedimientos seguidos por los scripts se muestran en el diagrama de la Figura 6.



Figura 6. Diagrama de flujo.

3. Resultados

En las figuras 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos por los métodos de [Briggs y Vincent 1992] y [Holloway 1997], y también los resultados del trabajo previo de [Oscanoa 2014], donde se calculan los vientos empleando las técnicas DBS y SA en el dominio del tiempo. Se puede observar que estos dos últimos métodos arrojaron direcciones muy similares, mas en la velocidad se aprecia una sobreestimación apreciable al utilizar la técnica SA.

Al comparar este trabajo previo con los resultados obtenidos por el método de [Briggs y Vincent 1992], se logra apreciar una gran similitud en la dirección de los vientos, en la velocidad los valores se encuentran en el mismo rango a los hallados por el método DBS.

Los resultados obtenidos por el método de [Holloway 1997] son muy ruidosos y están ligeramente sobre estimados en comparación con los resultados de la técnica DBS y el método de [Briggs y Vincent 1992]. Aun así se puede apreciar que están en el mismo rango que los vientos hallados con la técnica SA de [Oscanoa 2014], y siguen la tendencia de la dirección de los vientos.

4. Conclusiones

Se implementó con éxito el método planteado por [Briggs y Vincent 1992], hallando resultados similares a los obtenidos con la técnica DBS ([Oscanoa 2014]).

Con el método de [Holloway 1997] se obtuvieron resultados muy ruidosos, pero aun así estos permanecían en el rango de los vientos obtenidos con la técnica SA en el dominio del tiempo.

Es necesario mejorar las rutinas de remoción de interferencia, ya que ayudaran a eliminar los errores causados por datos inválidos.

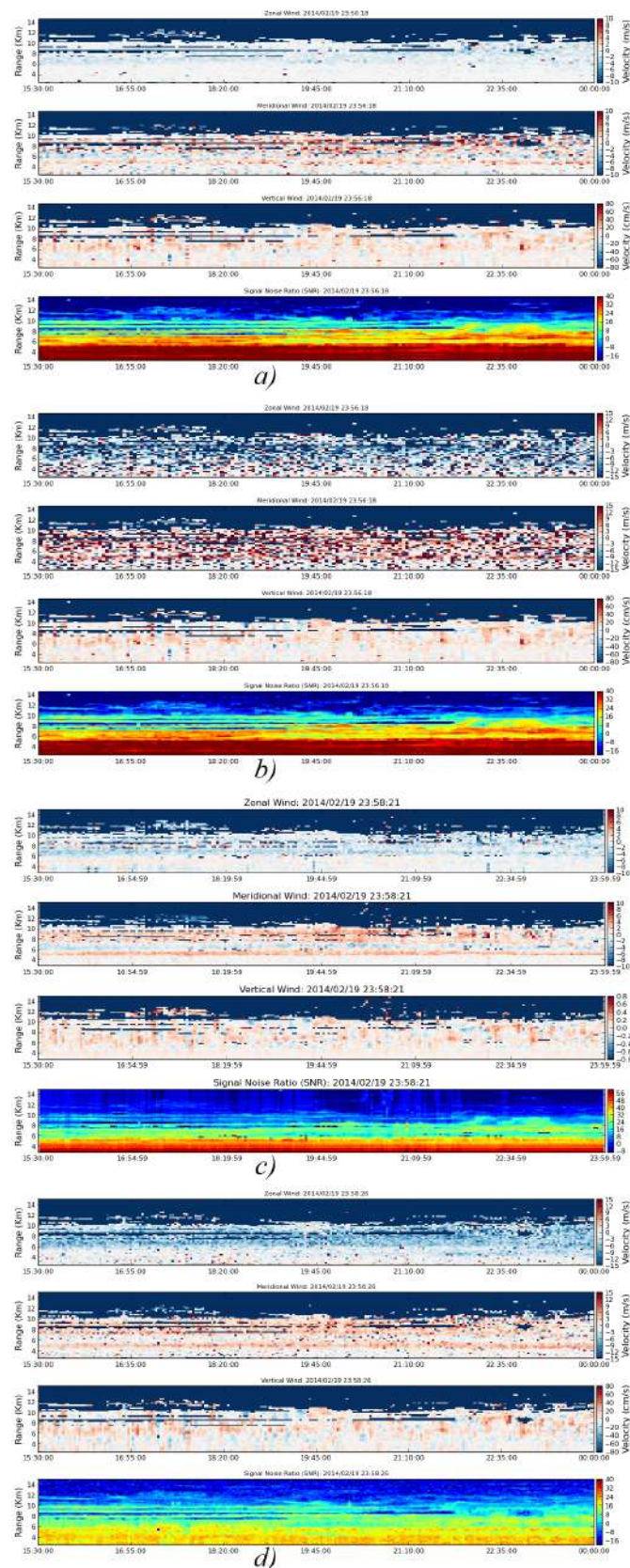


Figura 7. Vientos hallados por el método de: (a) BriggsVincent92, (b) Holloway97, (c) DBS, (d) SA en el dominio del tiempo. 19/7/2014.

Basados en los ahora 4 métodos, para hallar la velocidad de los vientos, implementados en Signal Chain se puede tener una base sólida de métodos para calcular con certeza los vientos.

6. Bibliografía

[Briggs 1984] Briggs, B. H. (1984), *The analysis of spaced sensor records by correlation techniques*, in *Handbook for the Middle Atmosphere Program*, 166-186, SCOSTEP Secretariat, Univ. of Illinois, Urbana, 1984.

[Briggs y Vincent 1992] Briggs, B. H., and R. A. Vincent, *Spaced-antenna analysis in the frequency domain*, *Radio Sci.*, 27, 117-129, 1992.

[Holloway 1997] Holloway, C., R. Doviak, S. Cohn, R. Latatits and J. V. Baelen, *Cross correlations and cross spectra for spaced antenna wind profilers, 2, Algorithms to estimate wind and turbulence*, *Radio Sci.*, 32, 967-982, 1997b.

[Doviak 1996] Doviak, R.J., R. J. Latatits, and C. L. Holloway, *Cross correlations and cross spectra for spaced antenna/radar profilers, 1, Theoretical analysis*, *Radio Sci.*, 31, 157-180, 1996.

[Sheppard y Larsen 1992] Sheppard, E. L., and M. F. Larsen, *Analysis of model simulations of spaced antenna/radar interferometer measurements*, *Radio Sci.*, 27, 759-768, 1992.

[Chau 1998] Chau, J. L., and B. B. Balsley, *A statistical comparison of horizontal winds obtained by a variety of spaced antenna techniques using the Jicamarca VHF radar*, *Radio Sci.*, 33, 1669-1683, 1998.

[Manual de experimento] Scipión, D., y M. Milla, *Manual de experimento DBS – SA (Febrero 2014)*, Radio Observatorio de Jicamarca, 2014.

[Oscanoa 2014] Oscanoa, J. A., *Radar perfilador de vientos a 50 Mhz*, Radio Observatorio de Jicamarca, 2014.

[Briggs 1980] Briggs, B. H., *Radar observations of atmospheric winds and turbulence; A comparison of techniques*, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 42, 823-833, 1980.

[Manual Desarrollador] Signal Chain - Manual de Desarrollador. En: http://10.10.50.96/projects/signal-chain/wiki/Manual_de_Desarrollador, Radio Observatorio de Jicamarca.

[Meek 1980] Meek, C. E., *An efficient method for analysing ionospheric drifts data*, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 42, 835-893, 1980.

[Sheppard 1993] Sheppard, E. L., M. F. Larsen, R. D. Palmer, S. Fukao, M. Yamamoto, T. Tsduda, and S. Kato, *A statistical comparison of spaced antenna and spatial interferometry wind estimation*, *Radio Sci.*, 28, 585-593, 1993.

[Holdsworth 1997] Holdsworth, D. A., *An investigation of biases in the full spectral analysis technique*, *Radio Sci.*, 32, 769-782, 1997.

[Signal Chain] Suárez, D., *Signal Chain*, Radio Observatorio de Jicamarca, 2013.

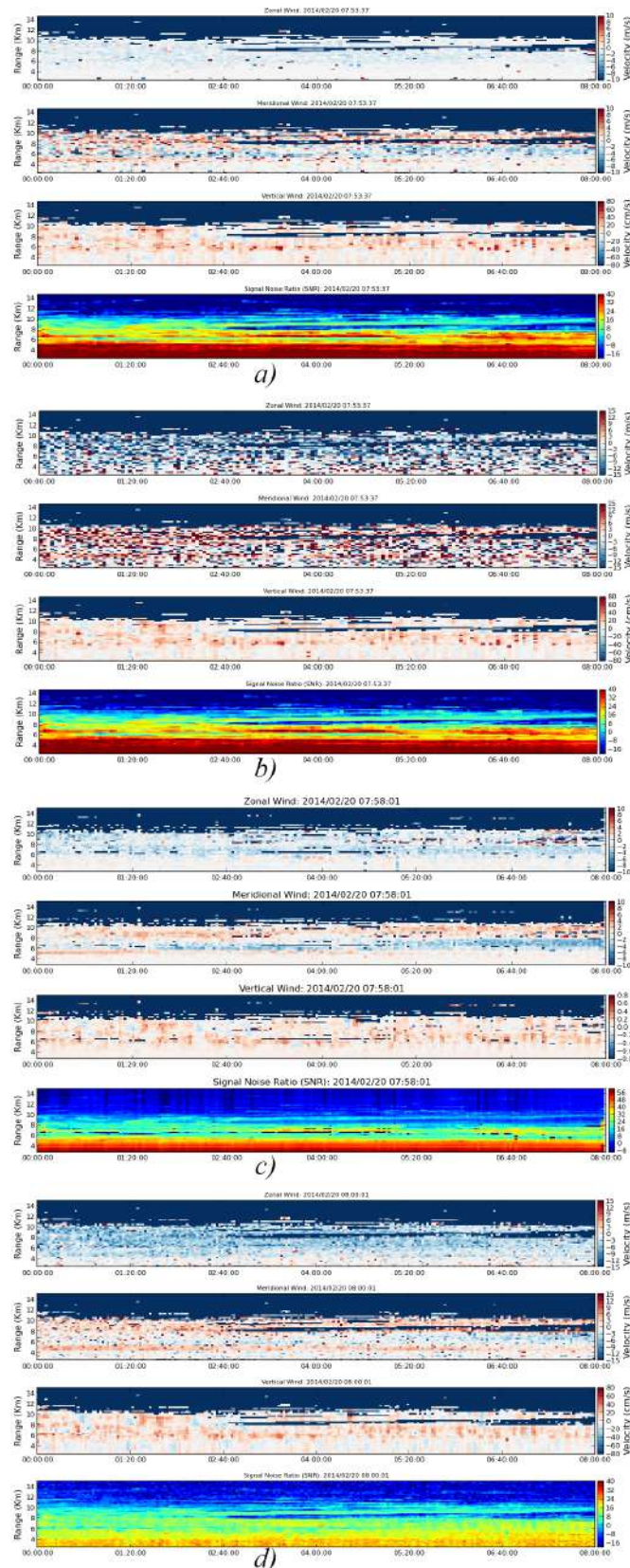


Figura 8. Vientos hallados por el método de: (a) BriggsVincent92, (b) Holloway97, (c) DBS, (d) SA en el dominio del tiempo. 20/7/2014.

MEJORAS AL SISTEMA DE RADAR MULTI-STÁTICO HF (IGP CORNELL)

IMPROVEMENTS TO THE MULTI-STATIC RADAR SYSTEM HF

Genaro Alberto Soriano Saaverdra

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ciencias
agenaro13@gmail.com

Asesores: Ing. Karim Kuyeng

Alexander Valdez

Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

El Radio Observatorio de Jicamarca (ROJ), tiene a su cargo distintos instrumentos de observación para el estudio de la ionósfera entre los cuales está el Radar HF. Este radar está encargado de determinar las máximas alturas de la señal reflejada en la ionósfera y así poder realizar un estudio tridimensional de las diversas propiedades de la ionósfera. Haciendo uso de tarjetas USRP el sistema HF emite pulsos desde una estación de transmisión a múltiples estaciones de recepción. La señal receptionada es almacenada y procesada por medio de un conjunto de librerías llamado Signal Chain, diseñado en Jicamarca; obteniendo así resultados gráficos como Relación Señal Ruido (SNR), Velocidad Doppler, Desfasaje y Coherencia. El presente trabajo expone la evaluación de las imágenes publicadas del radar HF por el Radio Observatorio de Jicamarca, los criterios utilizados para la elaboración de la base de datos de las imágenes del radar HF, y la implementación del programa de Máximas Alturas Reflejadas a las librerías de Signal Chain.

Palabras clave: radar HF, signal chain, máximas alturas reflejadas

Abstract

The Radio Observatory of Jicamarca (ROJ), it is in charge of different observation instruments for the study of the ionosphere including the RADAR HF. This radar is responsible of determining the maximum heights of the signal reflected on the ionosphere and so we can do a 3D study of the ionosphere's properties. Using the USRP Card, the HF system emits pulses from a transmission station to multiple receiving stations. The signal received is stored and processed by a set of libraries called Signal Chain, designed in Jicamarca; thus, obtaining results as Signal to Noise Ratio (SNR), Doppler speed, Phase shift and Coherence. This paper exposes the evaluation of the radar HF images published by the Radio Observatory of Jicamarca, the criteria used for the preparation of this data base of radar HF images, and the implementation of the program of Maximum Heights Reflected to the Signal Chain libraries.

Keywords: radar HF, signal chain, maximum heights reflected.

1. Introducción

El radar HF, encargado de determinar las máximas alturas de la señal reflejada en la ionósfera y así poder realizar un estudio tridimensional de las propiedades de la ionósfera, forma parte de los diversos instrumentos con los cuales cuenta el Radio Observatorio de Jicamarca para el estudio de la ionósfera. Este radar es particularmente especial ya que es un radar multiestático, es decir, está compuesto por una estación de transmisión y múltiples estaciones de recepción. Actualmente se cuenta con una estación de transmisión (Estación HF Tx) ubicada en el Observatorio de Ancón y 3 estaciones de recepción, una de ellas (Estación HFT) ubicada en el Observatorio de Huancayo y las otras 2 (Estación HF y Estación HFB) en el Radio Observatorio de Jicamarca donde se inició su funcionamiento en Enero del 2014.

En el proceso de transmisión el computador da la orden a la USRP para que genere las señales en 2 frecuencias, luego cada una de estas señales es amplificada y finalmente transmitida. La señal transmitida es reflejada por la ionósfera y captada por cada una de las antenas activas ubicadas en las estaciones de recepción.

Cada estación de recepción cuenta con dos antenas y dos frecuencias de operación, donde la señal recibida es amplificada y mandada al sistema de recepción que en nuestro caso cuenta con un módulo USRP N210. La señal se digitaliza y se envía al computador para su posterior análisis y almacenamiento.

Del proceso de recepción se obtienen perfiles de voltajes en el rango de alturas y en el dominio del tiempo, almacenados como datos en formato hdf. Estos datos son procesados e integrados cada 10 segundos para obtener un nuevo formato de datos llamado hdf5. Finalmente, estos datos hdf5 son procesados en el dominio de la frecuencia obteniéndose espectros los cuales son almacenados ahora en formato pdata, un formato mas liviano y de mayor accesibilidad para los usuarios dentro del ROJ ya que es un formato estándar del observatorio.

Los procesos a los cuales son sometidos los datos hdf5 y pdata se encuentran dentro de las librerías de Signal Chain, software modular desarrollado e implementado por el ROJ con la finalidad de facilitar el procesamiento de datos de radar.

Los resultados obtenidos por el radar HF son mostrados gráficamente gracias a los módulos de gráficos de programa Signal Chain, dentro de una base de datos de gráficos en donde se pueden apreciar gráficos tales como la Relación Señal Ruido (SNR), Velocidad Doppler, Diferencia de Fase y Coherencia entre los canales de una misma

frecuencia. Cada una de las imágenes tiene como eje vertical el rango de las alturas (0-1400km), como eje horizontal el intervalo de tiempo (24 horas partiendo desde la medianoche) y, mediante una escala de colores, la intensidad de la magnitud que caracterizan cada una de las gráficas.

A continuación se muestra la página web de Jicamarca donde se tienen los gráficos explicados posteriormente:



Figura 1. Página web de Jicamarca

Gráfica Relación Señal Ruido (SNR)

Muestra la intensidad de la señal reflejada para cada altura teniendo como referencia la señal de ruido.

Gráfica Velocidad Doppler

Mediante la comparación de las señales a una misma frecuencia registradas en las 2 antenas y transportadas por canales diferentes cada uno, esta gráfica refleja la velocidad doppler de las partículas ionizadas en la atmósfera:

Gráfica de Fase

Como resultado muestra la diferencia de fase entre los 2 canales de una misma frecuencia:

Gráfica de Coherencia

Revela la coherencia entre los canales de una misma frecuencia; es decir, la similitud entre las 2 señales.

Todos los resultados obtenidos mediante el procesamiento de datos del radar son publicados en la pagina web de Jicamarca (http://jro-app.igp.gob.pe/hfdatabase/webhf/web_signalchain/rawdata_test_new/#)

Es a partir de aquí que surge como primer objetivo del presente documento la revisión de la base de datos

del radar HF con la finalidad de evaluar la calidad de las imágenes, depurar las gráficas prescindibles, o volverlas a procesar en el caso sea necesario.

El segundo objetivo del presente trabajo describe el proceso de implementación de un nuevo programa en las librerías de Signal Chain. Este programa conocido con el nombre de Máximas Alturas Reflejadas genera una nueva gráfica Doppler en formato RGB y con mejor resolución que la gráfica producida por el módulo gráfico ya utilizado en Signal Chain; además crea un archivo “.out” donde almacena las alturas y el tiempo en el cual la señal transmitida es reflejada en la ionosfera.

2. Desarrollo

2.1. Parte I: Base de datos del Radar HF

Debido a que en durante el día la capa D de la ionósfera absorbe la señal transmitida haciendo que no ocurra reflexión en la capa F, por lo tanto, los tiempos de menor interés ocurren aproximadamente entre las 06:00 hasta las 18:00 horas, siendo prescindible cualquier imperfecto dentro de este intervalo de tiempo.

2.1.1. Revisión de la base de datos

A continuación se lista algunas particularidades encontradas y la posible causa del problema:

Imágenes incompletas: Gráficos con segmentos en blanco.

Imágenes con interferencia: Gráficas interceptadas por líneas de interferencia al punto de, en ocasiones, hacer indistinguible la señal en su interior.

Imágenes sin señal: Se atribuye a falla en el sistema de transmisión (no transmite señal).

Días con una sola frecuencia: Se encontraron días en los cuales estaba disponible solamente las gráficas que corresponden a una sola frecuencia.

2.1.2. Mejoras realizadas

Se redactó un listado, ordenado según el día del año, la fecha, la frecuencia y el canal de cada señal, de todos los días desde que entró en funcionamiento la estacione de recepción detallando en él la calidad de las imágenes: gráficas en buen estado (“ok”), gráficas con interferencia (“F”), gráficas incompletas (“P”), gráficas con solo ruido (“A”). También se detalló en la lista los días con bucle de carga (“C”) y días sin ningún tipo de datos (“--”).

Se vio necesario ubicar la pdata que daba origen a cada una de las imágenes dentro del sistema HF.

La información del número de pdata para cada una de los canales, la ubicación de la pdata y el número de serie del disco o la dirección del servidor web en el cual se encuentra también se añadió a la lista.

Se prosiguió a retirar las gráficas sin señal por ser prescindibles y aquellas con grandes franjas incompletas en horarios nocturnos (00:00-06:00 y 18:00-24:00) debido a que en esos horarios se puede apreciar mucho mejor los efectos de la Capa F de la Ionósfera.

Se observaron 2 casos particulares: habían días que no contenían gráficas para un canal o para los dos (en este caso días sin gráficas) pero que si contenían pdata correspondiente a ese día; por otra parte también se hallaron días con gráficas incompletas pero que entre la pdata de origen figuraba una cantidad igual a la de un día completo. En ambos casos se prosiguió a volver a generar las gráficas correspondientes para corroborar si eran las correctas.

2.1.3. Resultados

Del análisis de las imágenes en la base de datos del radar HF se obtuvo como resultado el siguiente cuadro:

Tabla 1. Resumen del análisis de imágenes.

Estación	HFA	HFB	HF Huancayo
Imágenes disponibles inicialmente	358	263	166
Imágenes retiradas	52	59	22
Imágenes disponibles	306	204	144

Además también se resume en el siguiente cuadro el número de días según el criterio que se empleó para retirarlos:

Tabla 2. Análisis de imágenes retiradas

Estación	HFA	HFB	HF Huancayo
Transmisor Apagado	35	8	7
Contenido Ajeno	2	4	13
Con interferencia	8	43	1
Poca Señal	7	4	1

2.2. Parte II: Implementación del programa de Máximas Alturas Reflejadas

El Programa de Máximas alturas Reflejadas” diseñado por el investigador principal del radar HF, el Dr. Hysell y escrito de manera lineal en lenguaje C es un programa que trabaja directamente con datos en formato hdf5, es decir, con voltajes en el dominio del tiempo, el cual tiene como primer objetivo almacenar dentro de un archivo con extensión ‘.out’ las alturas para las cuales la señal se ve reflejada con mayor intensidad y el tiempo en el cual ocurre; además de generar una gráfica Doppler en formato RGB con mayor resolución redefiniendo de manera diferente la variable ruido (“noise”) en comparación al método utilizado comúnmente dentro de las librerías de procesamiento de Signal Chain usado en el ROJ.

2.2.1. Análisis del programa

El programa de Máximas Alturas Reflejadas cumple con dos objetivos: graficar la velocidad Doppler en formato RGB; y hallar las alturas para las cuales la señal se ve reflejada con mayor intensidad junto al momento en el cual ocurre, guardando dicha información en un documento con extensión ‘.out’.

El programa lee un archivo en formato hdf5, extrae de él el parámetro ‘image’ y el parámetro ‘time’. El parámetro ‘time’ indica el momento en el cual se ha adquirido ese dato mientras que el parámetro ‘image’ contiene en sus 3 columnas los valores RGB y que indican el porcentaje de color rojo, verde y azul que se utilizará para graficar cada punto dentro las 1000 alturas almacenadas para un determinado tiempo.

El programa define las variables ‘noise’ (ruido) y ‘snr’ (relación señal ruido). La variable ‘noise’ es definida como el promedio de la décima parte superior de los valores dentro de cada columna de la variable

‘image’ obteniéndose así un arreglo de 3 valores; mientras que la variable ‘snr’ toma los valores dentro de ‘image’ y los reajusta comparándolos con la variable ‘noise’. Si el valor reajustado de la variable ‘snr’ es menor que 0.01 se redondeará a 0, caso contrario se amplificará su valor reparametrizándolo en un intervalo entre [0;255] para luego generar la gráfica utilizando las librerías de pyplot de Python.

Para realizar el segundo objetivo, el programa define la variable ‘profile’ donde almacena los puntos donde se registra una máxima señal, representado por la suma de las 3 componentes de la variable ‘snr’ para cada una de las alturas.

2.2.2. Implementación en Signal Chain

Una vez que la data es leída deberá ser procesada, motivo por el cual se implementó la unidad de proceso con el nombre de ‘jroproc_image.py’ en donde se define la clase ImageProc y que tiene como métodos, además del método Init, con el cual inicializa el módulo, y el método run, con el cual inicia su ejecución, a los métodos ‘getImageSNR’, encargado de obtener los valores de los ‘snr’; el método ‘getImageReflexion’ que encuentra las alturas en las cuales la señal es reflejada en la Ionósfera; y el método bubbleSort, ordenamiento utilizado dentro del método ‘getImageReflexion’.

El resultado del programa nos brinda solamente las alturas en donde se tienen la máxima reflexión y el tiempo correspondiente a cada una de ellas. Es aquí donde se ve la necesidad de implementar una nueva unidad de escritura bajo el nombre de ‘jroIO_image.py’ encargada de almacenar dentro del documento ‘.out’ los valores de las alturas en las cuales se dio la reflexión y el tiempo en el cual ocurrió.

2.2.3. Resultados

Se llegó a traducir exitosamente el programa de lenguaje C a Python, como prueba de ello se consiguió generar los mismos archivos con extensión “.out” mostrados a continuación:

La gráfica Doppler generada por el programa de Máximas Alturas Reflejadas, resalta por tener una mejor resolución en comparación con la imagen generada por Signal Chain utilizando una definición antigua de la variable RGB:

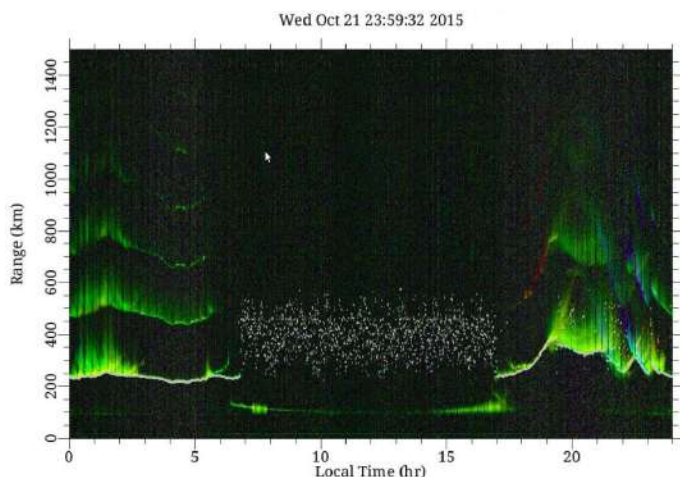


Figura 2. Gráfica Doppler del programa de Máximas Alturas Reflejadas.

3. Discusiones

3.1 Base de datos.

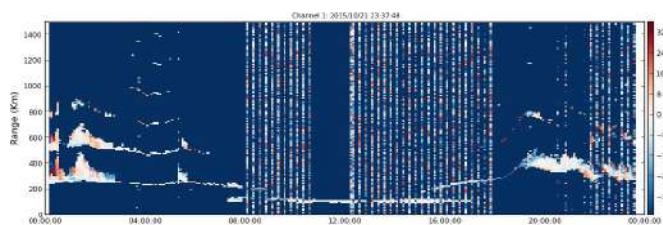


Figura 3. Gráfica Doppler generada anteriormente por Signal Chain

La mayoría de los días con imágenes de contenido incompleto eran originados por cantidades de pdata menores a las de un día habitual, es decir, carpetas con cantidad de archivos pdata menor a 144. Este hecho justifica el procesamiento incompleto de las imágenes, descartando así cualquier posible solución al problema.

Los errores encontrados en los días con el logo de un enlace roto fueron originados en primer lugar por incompatibilidad de las imágenes, es decir, no correspondían al sistema de imágenes HF y por lo tanto los nombres de las imágenes no tenían la misma forma; y en segundo lugar por imágenes dañadas o mal procesadas.

3.2. Implementación del programa de Máximas Alturas Reflejadas.

Si bien el resultado del '.out' son alturas y tiempo, y la clase Voltage es perfiles, alturas y tiempo, estos son datos completamente distintos. La clase Voltage registra en su interior la potencia en cada punto del rango de alturas y a lo largo de todo el rango de tiempo, mientras que el archivo '.out' selecciona de entre todos estas alturas solamente aquellas que contienen la máxima potencia, y selecciona de entre el rango de tiempo solo aquellos momentos en que ocurre estos máximos. De aquí se puede apreciar

que las dimensiones de ambos tipos de datos no serán necesariamente las mismas.

- La diferencia entre las 2 gráficas Doppler conseguidas con ambos programas radica en el modo en que está definido la variable 'noise', pues para el caso del programa de Máximas Alturas Reflejadas la variable se define como el promedio de la señal registrada en la región superior del rango de las alturas, asumiendo que por ser este intervalo el más alejado a la superficie de la tierra hay menor probabilidad de encontrar señal en esta región.

4. Conclusiones

4.1. Base de datos.

La base de datos cuenta finalmente con 334 días disponibles de la estación HFA, 183 días de la estación HFB Y 131 días disponibles en la estación HF Huancayo; siendo aproximadamente las imágenes retiradas 14% del total de imágenes en HFA, 24% del total de imágenes en HFB y 15% del total de imágenes en HF Huancayo.

Se realizó la depuración de imágenes innecesarias dentro del servidor web dejando únicamente aquellas imágenes en las cuales se pudiera distinguir una mínima cantidad de la señal.

4.2. Implementación del programa de Máximas Alturas Reflejadas

El programa de Máximas Alturas Reflejadas ya se encuentra disponible en lenguaje Python y fue implementado con éxito en las librerías de Signal Chain brindando una gráfica con mayor resolución que la generada por el código utilizado anteriormente además del archivo 'out' donde se encuentran la lista de las máximas alturas reflejadas de la ionósfera y el tiempo de ocurrencia.

5. Recomendaciones

Durante la búsqueda de pdata se pudo observar que en varios de los discos había poca cantidad de pdata, se podía encontrar desde 4 días hasta aproximadamente 80 días de pdata para cada una de las estaciones; en otras ocasiones se encontraron días con información repetida. Se recomienda que toda la pdata sea transferida a discos dedicados exclusivamente a almacenar estos archivos según la estación y la fecha para así mantener un buen orden y brindar mayor facilidad al momento de buscar esta información a futuro.

Es muy recomendable, en cuanto sea posible, comentar la mayor cantidad de líneas de código. Si bien el lenguaje Python y C++ se caracterizan por ser lenguajes de fácil entendimiento, no siempre se

va a tener una clara idea de lo que busca realizar o a donde desea llegar el programador.

6. Agradecimientos

Agradezco al Radio observatorio de Jicamarca y al Instituto Geofísico del Perú por la oportunidad brindada para mi capacitación y aprendizaje dentro del programa de prácticas pre profesionales.

A Alexander Valdez por el constante asesoramiento y su paciencia para transmitir sus conocimientos.

7. Bibliografía

ROJ. Alexander Valdez. Sistema HF-Software, Reporte Técnico, Diciembre 2015.

ROJ. Daniel Suarez. Signal Chain, Marzo 2013.

SISTEMA RECEPTOR DE DOBLE BANDA SATELITAL PARA LA ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO TOTAL DE ELECTRONES EN LA IONOSFERA.

DUAL-BAND BEACON SATELLITE RECEIVER TO ESTIMATE IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC)

Josemaría Gómez Sócola

Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas
Facultad de Electrónica y Telecomunicaciones
jmgomezsocola@jro.igp.gob.pe

Asesor: Edgardo Pacheco, Ph. D.

Radio Observatorio de Jicamarca
IGP

Resumen

En el Radio Observatorio de Jicamarca se está desarrollando un sistema receptor de señales satelitales. Este receptor terrestre podrá detectar señales satelitales y utilizarlas para obtener el contenido total de electrones en la ionosfera (TEC, por sus siglas en inglés) sobre la región Peruana. El Sistema receptor es parte de un proyecto que envuelve el desarrollo de transmisores de CubeSats para mediciones ionosféricas. El receptor terrestre tiene la capacidad de obtener la diferencia de fases de dos señales transmitidas desde nano satélites y satélites en general actualmente operativos y en un futuro de las señales del transmisor de nano satélite desarrollado en Jicamarca. Las mediciones de TEC obtenidas permitirán investigar la ionosfera ecuatorial, cuando se presenten irregularidades como la F Dispersa. En el presente trabajo de tesis, se explicará cómo el sistema receptor determina el TEC en la ionosfera usando la técnica de Doppler Diferencial y cómo las múltiples constelaciones como COSMOS y COSMIC ayudan a hacer aquellas mediciones.

Palabras clave: ionosfera, doppler diferencial, contenido total de electrones (TEC), Radio Observatorio de Jicamarca.

Abstract

A radio beacon receiver system is being developed at the Jicamarca Radio Observatory. This ground-based receiver will be used to obtain ionospheric total electron content (TEC) over the Peruvian region by detecting satellite radio beacon signals. This work is part of a project that involves the development of a CubeSat radio beacon for ionospheric measurements. The receiver station will have the capability to obtain differential phase measurements from current operational satellite radio beacons and from the new CubeSat radio beacon developed at the Jicamarca Radio Observatory. Due to the proximity to the magnetic equator, the obtained TEC measurements will allow the investigation of the equatorial ionosphere which plays a significant role in the generation of irregularities such as the equatorial spread F. In this opportunity, we will explain how the receiver system determines the TEC in the ionosphere using the Differential Doppler technique and how multiples scientific satellites constellations like COSMOS and COSMIC help us to do our measurements.

Keywords: ionosphere, differential doppler, total electron content (TEC), Jicamarca Radio Observatory.

1. Introducción

La ionósfera es la región de la alta atmósfera que contiene partículas con carga eléctrica que son los iones y electrones. Estas partículas cargadas son producidas por la ionización de la atmósfera neutra debido a la acción de la radiación solar ultra violeta y el impacto de partículas energéticas.

La ionósfera, para efectos prácticos, se considera localizada entre los 60 y los 2000 km de altura y está compuesta por gases ionizados, entre los principales se encuentran el Nitrógeno y el Oxígeno. La densidad máxima de la ionósfera se encuentra cerca a los 350 km de altura. Durante el día llega a concentraciones de electrones cercanas al orden de 10^6 cm^{-3} y durante la noche la densidad de electrones es del orden de 10^4 cm^{-3} . La proporción de la ionosfera donde se observa la densidad máxima en función de altura se llama la región F y la región entre los 100 a 160 km de altura se denomina la región E.

En estas regiones existen fenómenos físicos que no se comprenden en su totalidad. Debido a que el plasma o gases ionizados interactúan con campos eléctricos, magnéticos, corrientes eléctricas y gases neutros produciendo variaciones en la dinámica de la ionósfera, generando campos eléctricos polarizados, corrientes y desplazamiento de iones causantes de anomalías en la ionósfera.

En la región F de la ionósfera se observa un fenómeno físico muy particular llamado fenómeno de la F dispersa que consiste en el ascenso de burbujas de plasma de menor densidad al medio circundante producido por inestabilidades en la parte baja de dicha región, de manera análoga al ascenso de burbujas de aire en el agua.

Estas burbujas de plasma forman irregularidades y perturbaciones que pueden provocar distorsiones o fluctuaciones en las señales electromagnéticas que viajan a través de ella, pudiendo afectar a las señales de telecomunicaciones o de navegación por GPS.

Las medidas de densidad de electrones en la ionósfera están orientadas a mejorar el conocimiento y entendimiento de las características de esta región atmosférica y de sus irregularidades y fluctuaciones. [1]

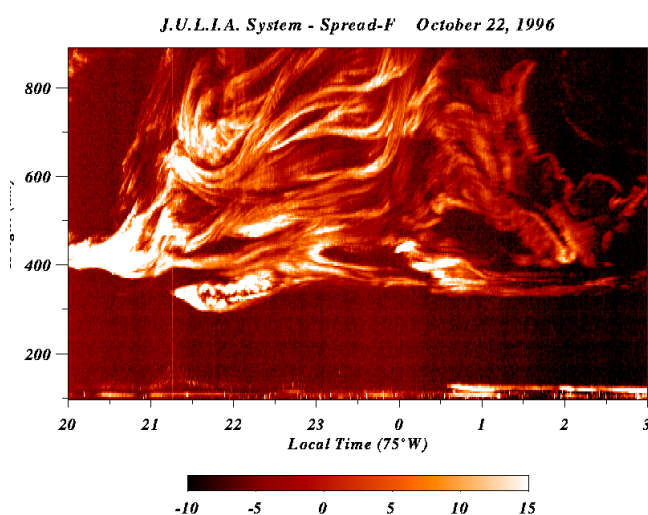


Figura 1. Anomalía de F Dispersa ubicada a unos 400Km de altura. Perfil sacado por el Radar JULIA en Radio observatorio de Jicamarca en 1996.

2. Teoría Involucrada

2.1. Contenido Total de Electrones

Se define el contenido total de electrones entre 2 puntos A y B, como el número total de electrones libres contenidos en una columna, de un m^2 , que une A con B, es decir:

$$TEC = \int_A^B Ne \cdot dz \quad (1)$$

Donde Ne es la densidad electrónica en $[\text{e}/\text{m}^3]$, dz es el incremento en altura en $[\text{m}]$, y la integral se calcula a lo largo de camino que une los puntos A y B. En el caso de ser una columna vertical, es decir, en la dirección del cenit tendremos el TEC vertical, y en el caso de tener una columna diagonal tendremos el Slant TEC o TEC diagonal. Los valores para TEC suelen variar entre 10^{19} y $10^{16} [\text{e}/\text{m}^2]$, [9] dependiendo de la hora del día, la estación del año, la actividad solar, la actividad geomagnética, la latitud magnética, etc. Esto genera que el TEC sea muy impredecible de un día a otro. La técnica más común para calcular el TEC, es a partir de dos observables. Estos observables, son parámetros que se derivan de las medidas de las señales de GPS. Estas medidas son a base de la diferencia de tiempos y fases basadas en la comparación entre la señal procedente del satélite, y la réplica de dicha señal generada por un receptor en tierra. Sin embargo para el presente proyecto se utilizara el método llamado Doppler Diferencial, el cual se basa en la extracción de las diferencias de fase.

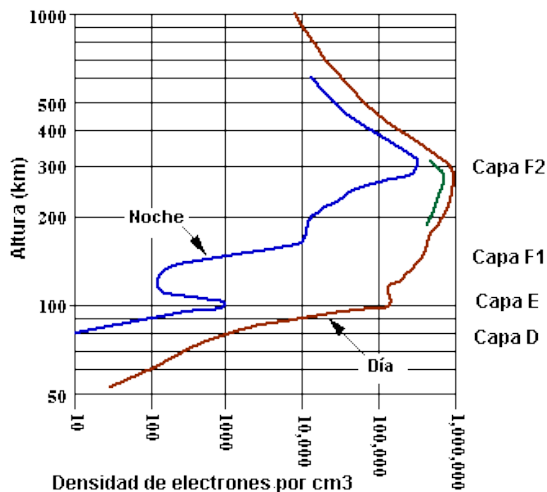


Figura 2. Distribución de la densidad de Electrones en función a la altura en la Ionosfera.

2.2. Rastreo Satelital

El problema de determinar las posiciones de los satélites es el mismo que se plantea al encontrar la posición de los planetas y de la luna en función del tiempo en cualquier instante. La similitud se debe a que dichos cuerpos carecen de sistemas de propulsión y se ven afectados por el mismo tipo de fuerzas gravitacionales.

Para poder determinar las posiciones de los cuerpos celestes usamos las leyes de Kepler, las cuales establecen que las orbitas de los planetas describen elipses, en las cuales, en uno de sus focos se encuentra el Sol. La forma real de la órbita de un satélite de Comunicaciones dependerá de la situación y la velocidad con la que este sea lanzado al espacio.

Las ecuaciones que gobiernan estos movimientos son :

$$r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \delta} \quad (2)$$

Donde,

a : Radio mayor de la elipse

e : Excentricidad de la elipse

δ : Ángulo del Vector de posición del satélite respecto al centro de la tierra.

La relación entre el periodo de rotación y el eje mayor se ve reflejada en la siguiente ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{K}} \quad (3)$$

Siendo K la constante de Kepler $K = 3,99 \cdot 10^{14} [\text{m/s}]^3$. De las ecuaciones anteriores se puede obtener la velocidad lineal del Satélite:

$$v = 2\pi \sqrt{K \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \quad (4)$$

Aparte de las leyes de Kepler para describir el movimiento de los cuerpos celestes es de aplicación importante las leyes de gravitación universal, de las cuales se puede calcular el periodo de traslación del satélite:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot M} a^3 \quad (5)$$

Donde M es la masa de la tierra, G la constante de Gravitación Universal, a es el eje mayor de la elipse.

2.3. Efecto Doppler

Cuando los satélites se desplazan alrededor de la tierra lo pueden hacer a gran velocidad, lo que hace necesario considerar el efecto Doppler que se produce. Este efecto consiste en la variación relativa de la longitud de onda, en este caso electromagnética, por un objeto en movimiento con respecto a un objeto estacionario.

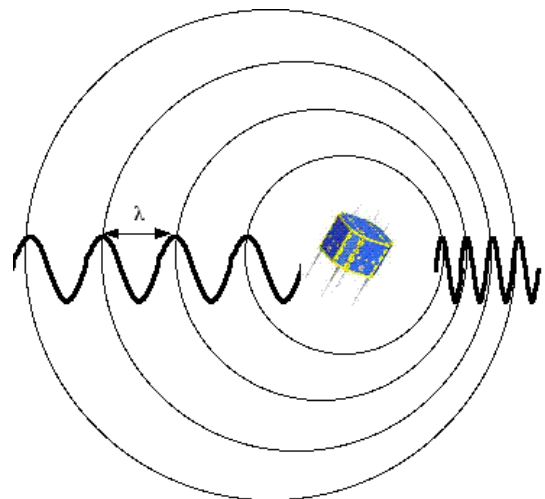


Figura 3.A. Efecto Doppler por movimiento del satélite

Para el propósito de este trabajo, es necesario conocer la velocidad con la cuales lo satélites que queremos "escuchar", se desplazan. Una vez conocida la velocidad en vueltas al día, se calcula el periodo de rotación dividiendo $24[\text{h}]/\text{Velocidad} [\text{Vueltas-Día}]$ y lo pasamos a segundos multiplicándolo por $3600[\text{s/h}]$. Aplicando la 3ª ley de Kepler, podemos despejar a , y de esa forma obtener la distancia del satélite a la estación terrena.

$$d = \sqrt[3]{\frac{T^2 \cdot K}{4\pi^2} a^3} \quad (6)$$

Donde $T = \frac{24}{VelSat} * 3600$ y $K = 3.99.10^{14}$.

Para calcular la distancia al satélite desde la estación terrena se deben aplicar los siguientes cálculos:

$a=re + d$. Siendo $re = 6.377$ km el radio de la tierra, debido a que se conoce a y re podemos hallar d . Ahora, para poder conocer la variación de la longitud de onda podemos comenzar hallando la velocidad angular:

$$T = \frac{24}{VelSat} * 3600.$$

Suponiendo que los satélites emiten beacons a una frecuencia constante: $y=A.\cos(\omega_0.t)$.

El efecto Doppler generará un desplazamiento que se puede expresar como: $y=A.\cos(\omega_0.t \pm \omega_d.t)$. Conociendo la velocidad con la que se acercan los satélites se puede determinar la frecuencia de desplazamiento de la forma:

$$\omega_d = \frac{2\pi \cdot V_l}{\lambda}$$

Para el cálculo del desplazamiento por efecto Doppler, solo se considera la proyección de la velocidad sobre la línea que une el satélite y la estación receptora.

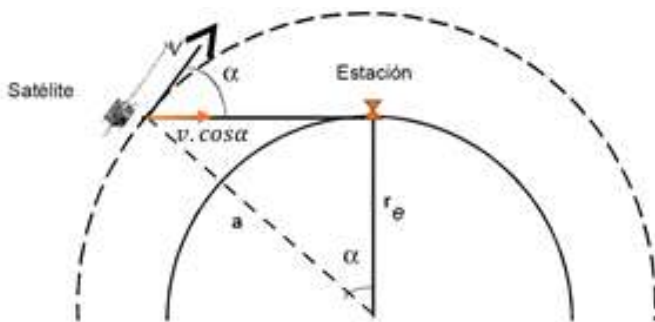


Figura 3.B. Proyección de la velocidad

Esto nos permite calcular la frecuencia de la señal recibida:

$$\omega_R = \omega_0 \pm \frac{\omega_0}{2\pi \cdot c} v \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

Es importante considerar el efecto Doppler, pues si se requiere procesar las señales, estas se pueden filtrar en función del tiempo considerando la ubicación de la señal en el espectro, conociendo los desplazamientos en frecuencia en función del tiempo.

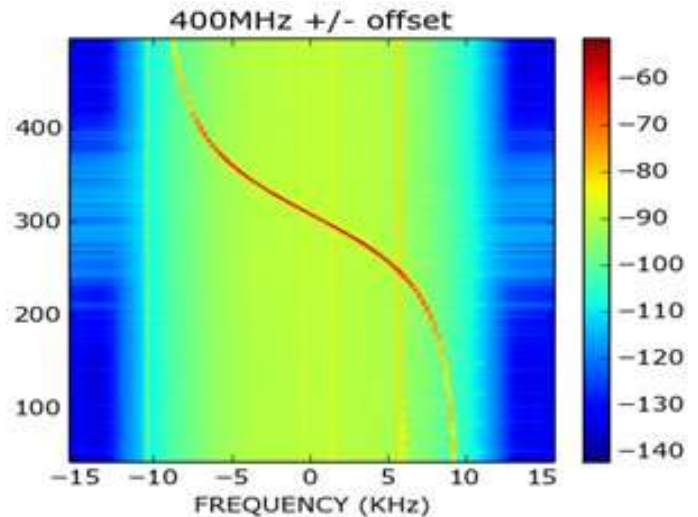


Figura 4.A. Espectrograma de una señal satelital (Roja en forma de S) después del Pre procesamiento. En el eje horizontal tenemos frecuencia y en el vertical tiempo. Satélite DMSP15, frecuencia 400MHz.

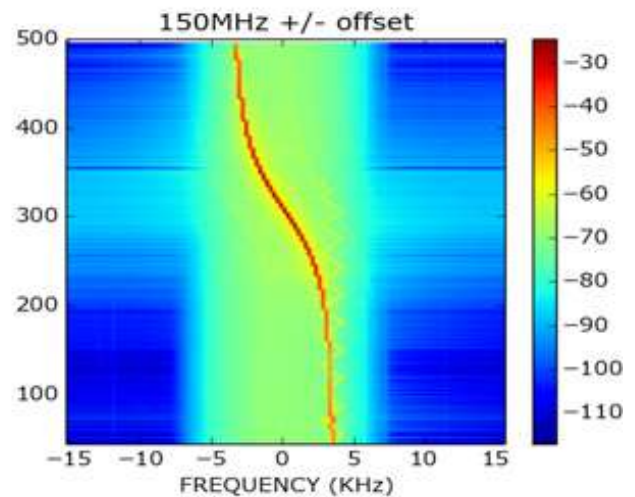


Figura 4.B. Espectrograma de una señal satelital (Roja en forma de S) después del Pre procesamiento. En el eje horizontal tenemos frecuencia y en el vertical tiempo. Satélite DMSP15, frecuencia 150MHz.

3. Método

Como hemos mencionado anteriormente el método que utilizamos para calcular el TEC es el Doppler diferencial. El cual mide la diferencia de longitudes de trayectoria entre 2 señales transmitidas desde un satélite de baja órbita. El marco teórico es trabajado detalladamente por Dr. Kudeki en su libro Applications of Radiowave Propagation, el cual empieza temas de propagación de ondas en un medio no homogéneo con constantes de refracciones variables en torno a la altura de la ionosfera(z)[2].

Donde el autor nos explica que si usamos dos frecuencias $f_1 = q_1 f$ y $f_2 = q_2 f$ podremos encontrar la diferencia de fase de la siguiente forma:

$$\Delta\omega_d \equiv \frac{\omega_{d2}}{q_2} - \frac{80.6 \pi}{c f} \left(\frac{1}{q_1^2} - \frac{1}{q_2^2} \right) \frac{d}{dt} TEC \quad (9)$$

Cuando utilizamos la ecuación 9 para la eliminando contribuciones de la densidad troposférica pues dichas contribuciones son iguales a ambas frecuencias y al restarlas se eliminan [5].

Dado que las constelaciones COSMIC y COSMOS tienen el estándar de usar las frecuencias duales de 150Mhz y 400Mhz, hemos decidido seguir el estándar y construir el sistema receptor para estas frecuencias aprovechando los satélites que se encuentren en órbita.

La diferencia de fases de 2 señales es expresada en la ecuación (9), la cual esta evaluada en una frecuencia común. Asumiendo que el resultado del procesamiento de las diferencias de fase son señales complejas y sinusoidales S150 y S400, podremos evaluar la diferencia de fase de la frecuencia en común como:

$$S_{1200} = (S_{150})^8 / (S_{400})^3 \quad (10)$$

Esta diferencia de fase en la frecuencia base de 1200Mhz es la diferencia de fase $\Delta\omega_d$ evaluada a la frecuencia del mínimo común múltiplo de dos frecuencias q_1 q_2 f donde la ecuación final queda representada por la ecuación 4 [6]

$$\Delta\omega_d = q_1 q_2 f = \frac{80.6 \pi}{c f} \left(\frac{q_2}{q_1} - \frac{q_1}{q_2} \right) \frac{d}{dt} TEC \quad (11)$$

La última expresión es diferente de la ecuación (9), en donde la frecuencia era seleccionada como el máximo común divisor (50MHz). Esta diferencia de fases finalmente es desenvuelta alrededor de los tiempos observados durante los pases de los satélites. El TEC calculado entre el satélite y la estación receptora es llamado el TEC relativo, el cual mide las variaciones del TEC oblicuo (en dirección del receptor al satélite), debido a los cambios de elevación del satélite y de las variaciones espaciales de la densidad de electrones presentes durante la trayectoria del satélite. [6].

4. Resultados

Después de aplicar la técnica del Doppler Diferencial a las señales de la data adquirida, por el procedimiento de la ecuación (10), obtuvimos el TEC diferencial. En las primeras tomas de datos teníamos una contribución de medidas de TEC por la diferencia de fase debida a la tarjeta que se encuentra dentro del SDR(Radio Definido por Software, por sus siglas en inglés). Este error se corrigió al hacer un experimento

que consistía en ingresar señales coherentes y en fase a nuestro sistema receptor, que en el caso ideal nos debería dar cero como diferencia de fase en la salida. Sin embargo, como mencionamos anteriormente el resultado de este experimento no fue cero si no una constante dependiente del tiempo, que nos ayudó a determinar la diferencia de fase que aporta el sistema.

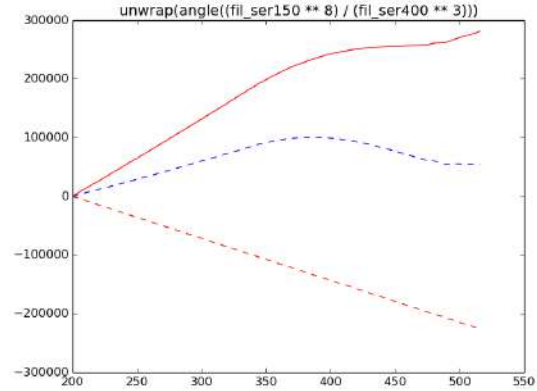


Figura 5. Diferencia de Fase Real (Azul punteada), Primeras mediciones sin corrección (Roja Solida) y error contribuido por el sistema (Roja Punteada), Pase del Satélite DMSP Dia 13 de abril

Finalmente Podemos estimar el TEC relativo de la diferencia de fase, despejando el TEC de la ecuación (10). Como podemos apreciar en la figura N° 5, el TEC relativo empieza en cero y aumenta hasta un maximo valor para después decrementar unos cuantos TECus. La unidad para calcular los TEC es el TECU donde 1 TECU es equivalente a 10×10^{16} unidades de TEC.

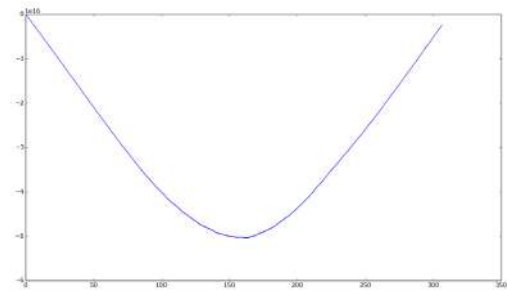


Figura 6. TEC Relativo del pase de 11 de Abril del 2016, Satélite FORMOSAT FM-5 Compensando el error sistemático.

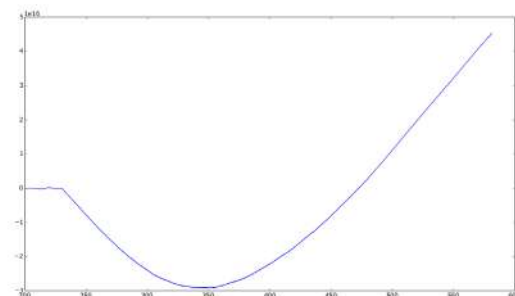


Figura 7. TEC Relativo del pase de 4 de Abril del 2016, Satélite COSMOS2463. Compensando el error sistemático.

5. Discusión

Los avances de los diversos métodos de estudio de la ionosfera pretenden buscar una solución para las caídas en los sistemas de comunicación debido a los efectos de fenómenos producidos por la alta cantidad de electrones presentes en medio o canal de comunicación. En la actualidad los receptores de satélites GPS han permitido caracterizar las densidades ionosféricas a través de otras técnicas que obtienen el contenido total de electrones. Sin embargo para poder generar modelos más avanzando se requiere de mediciones con mayor resolución espacial y temporal, es por lo cual emplear nano satélites de baja órbita y estaciones receptoras como la descrita en este proyecto, permitirán a los investigadores tener más detalle sobre la concentración de electrones, especialmente en esta parte de la región ecuatorial donde el campo magnético y la temperatura juegan un papel importante sobre la ionosfera. El método de Doppler Diferencial es descrito por muchos autores desde los años 70 y tal como lo hemos puesto en prueba, este funciona correctamente y nos da idea de las variaciones existentes del TEC oblicuo. Aún queda generar comparaciones entre estaciones receptoras puestas en la misma localidad, para poder comparar los resultados provistos por la mencionada técnica. Además de tratar de estudiar algunos otros fenómenos físicos que puedan estar relacionados al contenido total de electrones o la densidad de electores en la ionósfera obteniendo mucha mayor resolución debido a la generación de tomografías, ver figura 8.

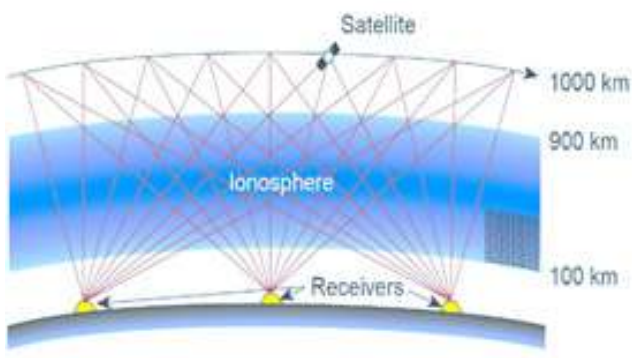


Figura 8. Tomografía Propuesta por Vierinen et al. [5] usando varias estaciones receptoras.

6. Conclusiones

El sistema receptor basado en un SDR (software Defined Radio) ha sido utilizado para adquirir señales de 150 MHz y 400 MHz transmitidas desde satélites de baja órbita sobre el espacio de Radio Observatorio de Jicamarca. Estos siguen un patrón muy similar a los presentados en Vierinen et al y Yamamoto et al [5].

Amplificaciones adicionales y etapas de filtrado analógico fueron usadas para mejorar la ganancia de las señales recibidas y eliminar diversas interferencias que afectan a las señales.

Resultados preliminares muestran mediciones de las diferencias de fase y del Contenido Total de Electrones relativo de los pases de satélites existentes, como COSMOS2463, DMSP15, FORMOSAT FM5 y muchos otros de las mismas constelaciones. Todos los datos fueron tomados por la estación desarrollada en la presente tesis en el Radio Observatorio de Jicamarca.

7. Agradecimientos

Se agradece al Instituto Geofísico del Perú y al programa Innóvate Perú por darme la oportunidad de ejecutar parte de este gran proyecto "Instrumentación para Nano Satélites".

Así mismo al Ph. D. Edgardo Pacheco, al Ing. Fernando Villanuevaz, al Ing. José Chávez y a todo el personal de ID+I por las orientaciones y asesorías en el presente proyecto.

También, al Programa Nacional de Innovación para la Competividad y Productividad (PNICP) del Ministerio de la Producción por su apoyo bajo el contrato No.410-PNICP-PIAP-2014.

8. Bibliografía

Bernhardt, P. A. and C. L. Siefring, *New satellite-based systems for ionospheric tomography and scintillation region imaging*, *Radio Sci.*, 41,

Erhan Kudeki 2010, *Applications of Radiowave Propagation*, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois, pp 34-50.

GNU Radio, <http://gnuradio.org/>. The Universal Software Radio Peripheral (USRP), <http://www.ettus.com/>.

John A. Klobuchar "Modern Total Electron Content measurement techniques", *Ionospheric Physics Division, Air Force Geophysics Laboratory Hanscom AFB, MA 01731* pp 137

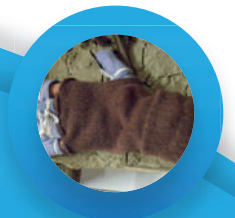
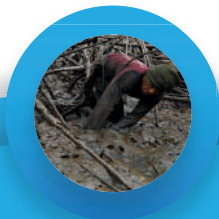
Juha Vierinen, 2011 *Beacon Satellite receiver software for ionospheric tomography*.

Mamoru Yamamoto, 2008, *Digital beacon receiver for ionospheric TEC measurements developed with GNU Radio*

S.W Dubey, R. and A. K. Gwal, "Ionospheric effects on GPS positioning", *Adv. in Space Research*, pp. 2478-2484, 2006.

W. P. Bradford and , J. J. J. Spilker, "Global positioning system: Theory and applications". I and II. Washington DC, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996

Geofísica y Sociedad



CADENA PRODUCTIVA DE *Anadara tuberculosa* (SOWERBY 1833) EXTRAÍDA EN EL SANTUARIO NACIONAL LOS MANGLARES DE TUMBES, 2015¹

PRODUCTIVE CHAIN OF ANADARA TUBERCULOSA (SOWERBY 1833) EXTRACTED IN THE NATIONAL SANCTUARY OF TUMBES MANGROVES, 2015

José Manuel Felpe Azabache Cobeña
Universidad Nacional de Tumbes
Facultad de Ingeniería Pesquera y Ciencias del Mar
aragon_224@hotmail.com

Asesores: Dr. Oscar Mendoza;
Mag. Alejandra Martínez
Subdirección de Geofísica y Sociedad
IGP

Resumen

La *Anadara tuberculosa*, conocida popularmente como concha negra, crece naturalmente entre las raíces de *Rhizophora mangle*, teniendo como principal zona de extracción en el Perú el Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes (SNLMT), y es considerada como el recurso hidrobiológico bandera de la región. Uno de los principales vacíos de información sobre este recurso se refiere a su cadena productiva, por lo que este trabajo se centró en identificar los procesos que conforman dicha cadena, así como la identificación de actores y sus interrelaciones.

Los procesos de la cadena productiva de *Anadara tuberculosa* en el SNLMT, incluyen la extracción, distribución y comercialización. Para el primer eslabón se identificaron los principales puntos de extracción (conchales), métodos de extracción, indumentaria, utensilios y los principales actores que incluyen a extractores concheros e instituciones como Sernanp, Produce, Imarpe, OEFA y Direpro. Para el segundo eslabón, se identificaron los lugares de comercialización del recurso en la región, tanto fresco como con valor agregado (centros de acopio, mercados y restaurantes), lográndose observar la incorporación de *Anadara similis* (concha huequera), y de la concha negra proveniente del vecino país de Ecuador. Además se identificó una etapa final de mercado, orientada al consumo local, y con una venta reducida para el consumo nacional.

Palabras clave: *anadara tuberculosa*, eslabón, cadena productiva.

Abstract

The *Anadara tuberculosa*, popularly known as “concha negra”, grows naturally in the roots of the *Rhizophora mangle*, being the National Sanctuary of Tumbes Mangroves (SNLMT) the main extraction zone in Peru, and is considered the flagship product of the region. One of the main gaps in information on this resource it's the referred to the productive chain, so this work was focused The productive chain processes in the SNLMT, include extraction, distribution and marketing. For the first link, the main points of extraction (“conchales”), extraction methods, work clothes and utensils, and the main stakeholders – including the “concheros” and institutions like Sernanp, Produce, Imarpe, OEFA and Direpro were identified. For the second link, the marketing venues were identified in the region, including both fresh and value-added (gathering centers, markets and restaurants), observing the incorporation of *Anadara similis* (concha huequera), and *Anadara tuberculosa* from the neighboring country of Ecuador. Besides, a final stage market, oriented to the local consumption, with reduced sales for domestic consumption, was identified.

Keywords: *anadara tuberculosa*, link, productive chain.

¹Tesis con la cual se obtuvo el grado de Ingeniero Peaquero, en el marco del proyecto “Impacto de la Variabilidad y Cambio Climático en el Ecosistema de Manglares de Tumbes” ejecutado por el IGP.

1. Introducción

En Perú, los estudios sobre cadenas productivas en recursos hidrobiológicos actualmente son escasos. En Tumbes la mayor parte de los recursos que sustentan las cadenas productivas de las diferentes pesquerías, provienen de la pesca artesanal, siendo fundamentalmente, pescados frescos enteros, congelados, ostras, calamares, pulpos, langostinos, cangrejos y conchas. La importancia del estudio de las cadenas productivas no solo radica en buscar una mayor competitividad al recurso en el mercado, sino que también estos estudios puedan servir como una herramienta de gestión para las instituciones encargadas de su protección.

La mayor parte de conchas negras proviene de la extracción en el SNLMT y la mayoría de personas que se dedican a la extracción de conchas en Tumbes, no poseen permiso para la extracción, comercialización y distribución respectiva. Por ello, la primera venta del producto se puede dar en las afueras de las asociaciones, en el momento que cada extractor conchero culmina su faena, y suele ser de manera directa a consumidores o intermediarios.

Una gran parte de los extractores venden los moluscos extraídos en el centro de acopio Los Tumpis y el Mercado Modelo de Tumbes, y al no contar con autorización, realizan una venta sin un control alguno sobre el recurso.

Según la información recopilada, el recurso no recibe ningún tipo de procesamiento, los intermediarios adquieren el producto en los centros de acopio, mercados o directamente de los extractores.

1.1. Objetivos

Objetivo general

- Determinar la cadena productiva de *Anadara tuberculosa* extraída del Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes.

Objetivos específicos

- Determinar la secuencia de la cadena productiva de *Anadara tuberculosa*.
- Identificar los eslabones de la cadena productiva de *Anadara tuberculosa*.
- Identificar y analizar los actores que intervienen en cada eslabón identificado de la cadena productiva de *Anadara tuberculosa*.

2. Metodología

2.1. Lugar de ejecución de la investigación

El presente estudio se realizó en ambientes tanto productivos como de comercialización de características diferentes teniendo en común la participación del recurso *Anadara tuberculosa* extraída del SNLMT y comercializada en la región de Tumbes (centros de acopio, mercados locales y restaurantes).

2.2. Muestra

En el área de estudio se evaluó a 52 extractores artesanales de conchas negras, carnetizados por el Sernanp, a 9 comerciantes de concha negra en el centro de acopio Los Tumpis y 7 en el Mercado Modelo de Tumbes. Asimismo, se registraron los principales restaurantes turísticos de la región y compradores del recurso en los diferentes establecimientos. También se tomó registro de los diferentes organismos encargados de la regulación del recurso como:

- Sernanp - Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas
- Direpro - Dirección Regional de Producción
- Produce - Ministerio de la Producción
- OEFA - Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental
- marpe - Instituto del Mar del Perú

2.3. Recolección de información

Se utilizaron diversos tipos de fuentes: funcionarios de organismos encargados de la regulación del recurso, especialistas en extracción del recurso, investigaciones publicadas, etc.

Asimismo, se elaboró un esquema con la estructura de la cadena productiva (Figura 1). Se identificaron los eslabones de la cadena productiva, así como los actores involucrados en la misma, para luego proceder a elaborar las encuestas de acuerdo a las características de cada actor.

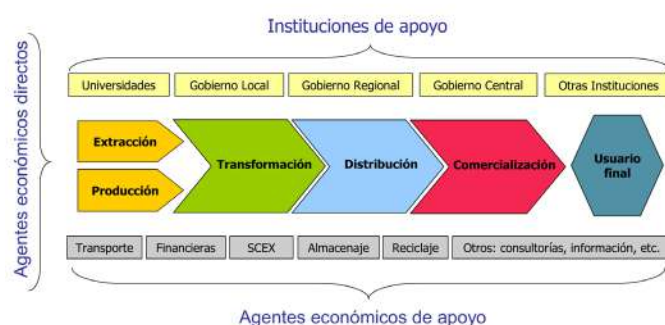


Figura 1. Componentes de una cadena productiva
Fuente: Ministerio de la Producción (2007)

3. Resultados

3.1. Extracción

3.1.1. Asociaciones de extractores de concha negra

En la zona de amortiguamiento del área protegida se encuentran ubicadas las seis asociaciones de recursos hidrobiológicos (Figura 2), las cuales han sido evaluadas por el comité de ética del SNLMT. De información recopilada en el Sernanp se obtuvo que la asociación AEXAPROH es la que cuenta con el mayor porcentaje de extractores concheros entre sus asociados (Figura 3).

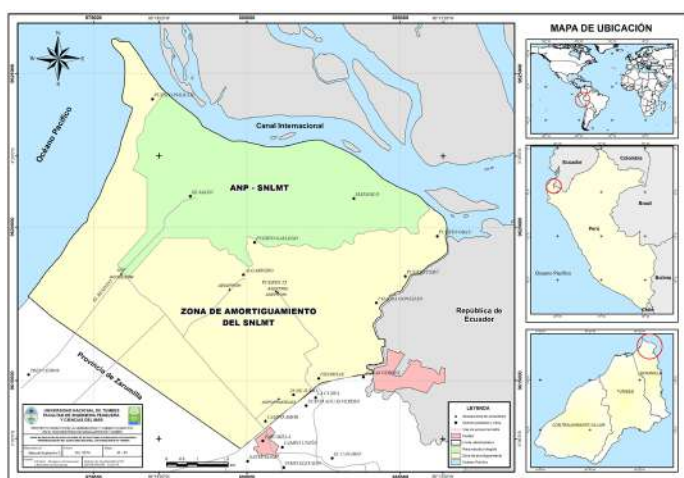


Figura 2. Ubicación de asociaciones de extractores artesanales de recursos hidrobiológicos del Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes.

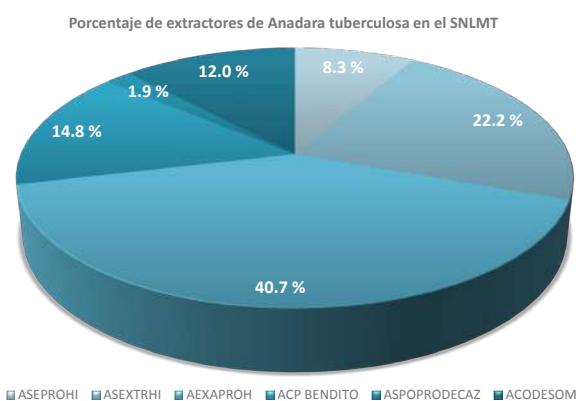


Figura 3. Extractores de concha negra por asociación en el SNLMT.

La asociación AEXAPROH - Los Tumpis es la única que se encuentra cultivando conchas negras en linternas (Figura 4).



Figura 4. Cultivo de conchas negras en linternas

3. Resultados

3.1.2. Extracción de concha negra

Por información recopilada en entrevistas a organismos reguladores del recurso concha negra, se obtuvo que el número de extractores concheros formalizados (carnetizados por el Sernanp y la Direpro) es de 108.

En entrevistas realizadas a extractores de concha negra, manifestaron que realizan su faena de trabajo durante la marea baja, realizando la extracción en zonas colindantes a sus asociaciones, requiriendo para esto el uso de una indumentaria especialmente adaptada por ellos. Esta consiste en utilizar un pantalón largo de color oscuro, en algunos casos un polo manga larga o una manga confeccionada por ellos; guantes de jebe o tela, a los cuales se les corta la parte en la que ingresan los dedos, ya que al momento de colocarse el guante se le amarra otra costura que cubre los dedos a los que se conoce como dedales, toda esta indumentaria va bien sujeta a ambos brazos del extractor (Figura 5).

Además, los extractores de concha utilizan zapatos de jebe, los cuales solo les deben llegar hasta aproximadamente el tobillo del extractor, para darle una mayor facilidad de movimiento dentro del manglar, y a la vez, para protegerse de especies tales como el camarón brujo o el sapo brujo. También se observó que algunos extractores utilizan una especie de gorro, al que denominaron capucha.



Figura 5. A) Extractor de concha negra con su respectiva indumentaria; B) Guante utilizado por extractor de concha negra, a cada dedo va amarrado una tela conocida como dedal.

Los extractores de concha negra utilizan como único medio de transporte dentro del SNLMT un pequeño bote al que denominaron canoa, requiriendo el uso de remos para poder trasladar la misma (Figura 6). La extracción del molusco se realiza mediante el método que se denomina tanteo, el cual consiste en introducir las manos en el fango cerca a las raíces de mangle para luego extraer y colocar los bivalvos capturados en una bolsa confeccionada con paño anchovetero con dos tamaños de malla, una que compran en Ecuador (1,3 cm de lado), y otra confeccionada por ellos mismos (0,7 cm de lado), las cuales en ocasiones están sujetas a una manguera de plástico que le dan una forma de canastilla, al que llamaron jicra (Figura 7). A todo este procedimiento

se le denomina concheo (Poma 1981 citado por Imarpe 2011), y se efectúa durante el día en un lapso de 5 a 6 horas durante la marea baja o bajamar.



Figura 6. A) Canoa: medio de transporte acuático utilizado por los extractores de concha negra; B) Extractor de concha negra utilizando remo para poder trasladar la canoa



Figura 7. A) Método de extracción de conchas; B) Jicra: utensilio para acopio de conchas.

3.2. Producción o fase de laboratorio

Este eslabón de la cadena productiva de *Anadara tuberculosa* en Tumbes, aún se encuentra en etapa de desarrollo. Desde el 2007, la empresa pesquera Marinazul S.A. viene realizando investigaciones en diversos organismos acuáticos, contando en la actualidad con un laboratorio implementado (Figura 8) en donde se viene trabajando en la reproducción del mencionado molusco. En entrevistas a funcionarios de organismos reguladores del recurso concha negra, estos manifestaron que un primer avance se realizó a través de un proyecto ejecutado por la ONG MEDA, sobre el repoblamiento de *Anadara tuberculosa* en el ecosistema de los manglares de Tumbes.



Figura 8. Laboratorio Marinazul S.A.

3.3. Comercialización

La comercialización de las conchas negras extraídas del SNLMT se ha venido dando de forma informal y sin mayor control, llegando incluso a ser comercializada por debajo de las tallas mínimas de captura recomendadas por Produce (4,5 cm) agregando a esto la extracción en periodos de veda (del 15 de febrero hasta el 31 de marzo).

3.3.1. Centro de acopio Los Tumpis

Este es el único centro de acopio en la región de Tumbes. De la muestra analizada, se obtuvo que un 20% de comerciantes de *Anadara tuberculosa* cuentan con un establecimiento; mientras que el otro 80 % de los comerciantes realizan dicha actividad a la intemperie. Ambos utilizan una especie de batea, en donde es depositado el recurso. Además, en la venta se incorpora la concha huequera (*Anadara similis*), la cual es comercializada también bajo el nombre de concha negra.

3.3.2. Mercado modelo de Tumbes

En visitas técnicas realizadas al Mercado modelo de Tumbes y de la muestra analizada, se encontró que solo un 10% de comerciantes de *Anadara tuberculosa* utilizan un puesto, mientras que el otro 90 % comercializan el recurso a la intemperie, utilizando en algunos casos una especie de batea, al igual que el centro de acopio Los Tumpis.

3.3.3. Aguas Verdes

En visitas técnicas realizadas a Zarumilla se encontró que existe una zona en Aguas Verdes donde se comercializa el recurso *Anadara tuberculosa*, el cual proviene de Ecuador (comerciantes ecuatorianos), siendo comercializado a la intemperie, utilizando una especie de batea, al igual que en Tumbes.

3.4. Distribución

La distribución de conchas negras es variada ya que en algunos casos es previa coordinación con un ama de casa, restaurante o algún acopiador, y puede darse en el centro de acopio Los Tumpis, en el mercado local, o en forma espontánea. En los dos últimos casos, la comercialización se da en mayor cantidad. El transporte de conchas puede realizarse en jicras, mochilas o bolsas de polietileno. La distribución al mercado nacional se hace por medio de sacos y en altas cantidades.

3.5. Consumidor final

Solo se consume la parte del músculo del molusco. De entrevistas realizadas a consumidores se obtuvo información de que los clientes tienen como

principal punto de compra el Centro de Acopio Los Tumpis. El consumo de la concha negra se produce principalmente en restaurantes, y en ocasiones se consume en los hogares. Se sirve habitualmente como un plato típico de la región y en algunos de los restaurantes más visitados por turistas. Otros usos de la concha negra son las valvas o conchas que se utilizan para la elaboración de bisutería, la cual es comercializada a turistas.

3.6. Concha negra proveniente de Ecuador

En entrevistas a comerciantes de concha negra, manifestaron que en ocasiones conchas negras comercializadas en Perú son provenientes de Ecuador, debido a que a los extractores comerciantes ecuatorianos les resulta mucho más factible comercializar las conchas en Perú. Gran parte de estas tienen como destino departamentos del sur del país y un reducido número se comercializa en la región.

3.7. Cadena productiva

La cadena productiva de conchas negras inicia en la etapa de extracción de moluscos del medio natural. La mayor parte del recurso, que se comercializa en Tumbes es extraído principalmente del SNLMT. La distribución puede darse a restaurantes, centro de acopio Los Tumpis o el mercado local, realizándose en mayor cantidad en estos dos últimos. La distribución al mercado nacional se hace por medio de intermediarios (locales o de nacionalidad ecuatoriana) los cuales necesitan de una guía de remisión para lograr distribuirlo fuera de la región.

El tercer eslabón de la cadena, la comercialización, se realiza de forma informal y sin mayor control; en algunos casos, el comerciante no cuenta con un establecimiento por lo cual realiza la comercialización a la intemperie, y sin garantía de inocuidad. Finalmente, el eslabón terminal de la cadena, el consumidor, puede ser local o turista, dado que el consumo final no solo se encuentra distribuido entre las amas de casa de la región, sino también entre los comensales en los diferentes restaurantes, los cuales en ocasiones pueden ser extranjeros.

En la Figura 9 se muestra un esquema que contiene los actores y flujos del producto en la cadena productiva. Dado a que existe una gran informalidad en la gran mayoría de los procesos, se podrían presentar relaciones y flujos alternativos a los mostrados.

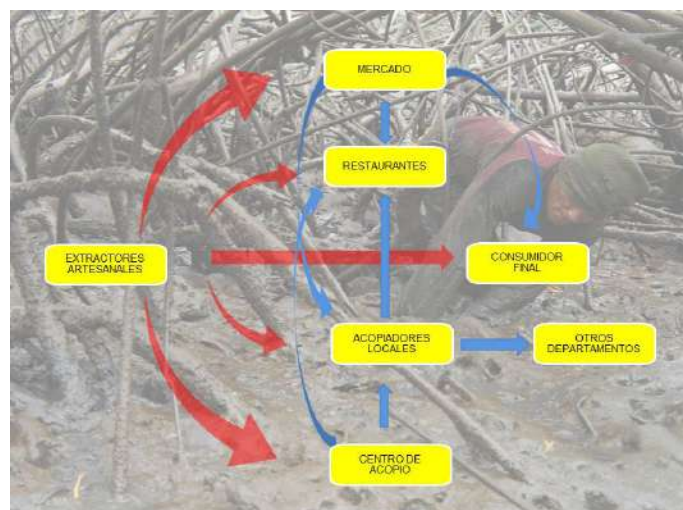


Figura 9. Cadena productiva de *Anadara tuberculosa*

4. Discusión

Para el Ministerio de la Producción (2007), la cadena productiva es un sistema que agrupa a los actores económicos interrelacionados por el mercado, el cual incluye las fases de provisión de insumos, producción, conservación, transformación, distribución, comercialización y consumo tanto en mercados internos como externos, afirmando, que una cadena productiva puede iniciar desde la fase de producción o extracción, lo que concuerda con la información hallada en el presente trabajo, no encontrándose aun presente la fase de transformación, además de encontrarse en desarrollo la fase de producción de semilla en laboratorio.

5. Conclusiones

El flujo de la cadena productiva de concha negra es:

Extractor – venta directa.

Extractor – acopiador – comerciante minorista – restaurantes/consumidor.

Extractor – acopiador – comerciante mayorista – interior del país.

En las zonas del SNLMT en donde está prohibido el ingreso de extractores, el tamaño de longitud valvar de la concha negra es superior al de las zonas permitidas para la extracción, lográndose encontrar ejemplares con una talla de longitud valvar de hasta 7,5 cm. Esto probablemente se deba a que son zonas intangibles y vienen siendo patrulladas por el Sernanp. A pesar de existir la normatividad para la sostenibilidad del recurso *Anadara tuberculosa*, existe un gran número de extractores informales.

La extracción de concha negra es una actividad meramente artesanal. La mayoría de las personas que se dedican a la extracción en el SNLMT no poseen el permiso para la extracción, otorgado por el Sernanp y la Direpro.

Gran parte de las conchas negras comercializadas en Tumbes son provenientes de Ecuador, debido a que a los comerciantes les resulta mucho más factible comercializar las conchas en Perú. La distribución de conchas negras al interior del país se realiza por medio de intermediarios, especialmente a través de minoristas ubicados en mercados populares o centros de acopio. Existe un volumen elevado de conchas que se vende a diferentes departamentos del país.

6. Recomendaciones

Exigir a las autoridades locales hagan cumplir y respetar la normatividad vigente: talla comercial y periodo de veda.

Establecer cuotas de extracción para tratar de mitigar los elevados índices de extracción.

Formalizar a los comercializadores (pequeños y medianos), y exigir un lugar adecuado para la comercialización que cumpla con las condiciones de inocuidad.

Solicitar capacitaciones respecto a las formas de venta y la sanidad adecuada.

7. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú – IGP, que con el apoyo del International Development Research Centre IDRC (www.idrc.ca), me brindaron todas las facilidades para alcanzar efectuar mi tema de tesis. Al Dr. Oscar A. Mendoza Neyra y la Mag. Alejandra Martínez Grimaldo, por su tiempo y apoyo incondicional durante el presente trabajo.

8. Bibliografía

Instituto del Mar del Perú. 2011. Informe de concha negra. Boletín informativo.

Instituto Nacional de Recursos Naturales, CTAR TUMBES y PRO NATURALEZA. 2001. Estrategia de conservación del ecosistema de los manglares de Tumbes-Perú, 2001 – 2010. Tumbes, Perú.

Ministerio de la producción. 2007. Cadenas productivas de la acuicultura peruana. Despacho Viceministerial de Pesquería, Dirección General de Acuicultura. Perú.

Rusu, C. 2011. Metodología de la Investigación. Universidad Cesar Vallejo. 19 p.

Tresierra, A. 2000. Metodología de la investigación científica. Primera Edición. Trujillo.

CAPACIDAD DE CARGA DE LOS CIRCUITOS TURÍSTICOS DEL SANTUARIO NACIONAL LOS MANGLARES DE TUMBES Y DEL CIRCUITO TURÍSTICO DE PUERTO PIZARRO, TUMBES, 2013 - 2014

TOURIST CARRYING CAPACITY OF TOURIST CIRCUIT OF TUMBES NATIONAL MANGROVE SANCTUARY AND PUERTO PIZARRO TOURIST CIRCUIT, TUMBES 2013 - 2014

María Roxana Prado Mendoza
Universidad Nacional de Tumbes
Facultad de Ciencias Agrarias
maroxy.206@gmail.com

Asesores: Mag. Luis Bermejo;
Mag. Alejandra Martínez.
Subdirección de Geofísica y Sociedad
IGP

Resumen

El presente estudio se desarrolló en el ecosistema manglar del Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes (SNLMT), distrito y provincia de Zarumilla y en los manglares de Puerto Pizarro, distrito y provincia de Tumbes, entre el 2013 y el 2014. El objetivo fue determinar la Capacidad de Carga Turística (CCT) de los circuitos turísticos que ofrece el SNLMT y Puerto Pizarro, identificando variables físicas, sociales, ambientales y biológicas de cada área.

La recopilación de información se realizó a través de la revisión bibliográfica de estudios, revistas, investigaciones, etc., e información recopilada a través de salidas técnicas in situ. Para cumplir con el objetivo principal de la investigación primero se determinó la situación actual y se elaboró mapas cartográficos de cada circuito existente en las áreas de estudio, luego se determinó la CCT adoptando la metodología de Cifuentes (1992) y de Amador et al., (1996) a las características de las áreas de estudio. Los resultados muestran que el número de visitantes que ingresan al SNLMT es menor a la Capacidad de Carga calculada, lo que permite mantener en buen estado sus características naturales. Mientras que en Puerto Pizarro el ingreso actual es mayor a la Capacidad de Carga calculada, por lo que se recomienda tomar medidas pertinentes para evitar alteraciones en el ecosistema manglar.

Palabras clave: turismo sostenible, capacidad de carga turística.

Abstract

The data collection was through literature review of studies, journals, research and information gathered through technical outputs in situ. To fulfill the main objective of the research, first the current situation was determined and cartographic maps of each existing circuit was developed in the study areas, then the CCT was determined by adopting the methodology of Cifuentes (1992) and Amador et al. (1996) to the characteristics of the study areas. The results show that the number of visitors entering the SNLMT is less than the calculated load capacity, which keeps in good condition its natural characteristics. While in Puerto Pizarro current income is greater than the calculated load capacity, so it is recommended to take appropriate measures to avoid disturbances in the mangrove ecosystem.

Keywords: sustainable tourism, tourist carrying capacity.

¹Tesis con la cual se obtuvo el grado de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente, en el marco del proyecto "Impacto de la Variabilidad y Cambio Climático en el Ecosistema de Manglares de Tumbes" ejecutado por el IGP.

1. Introducción

Tanto el Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes SNLMT (con categoría de protección) como los manglares de Puerto Pizarro (sin categoría de protección) son zonas con diferentes características organizativas, sociales y económicas.

Tanto el SNLMT como Puerto Pizarro son potenciales atractivos turísticos, que proporcionan oportunidades diferenciadas para la recreación, esparcimiento al aire libre, disfrute de los valores naturales y culturales, tanto para los visitantes nacionales como extranjeros, que ingresan no solo con fines científicos y recreativos sino también con fines de conservación.

En base a lo anterior era necesario determinar la Capacidad de Carga Turística (CCT) para estas dos áreas, ya que las actividades desarrolladas como turismo tradicional de masas y sin control pueden conllevar a la degradación de éstas, generando pérdidas de la diversidad biológica y cultural, como base del atractivo turístico (Brenes et al., 2004). Esta información se podría aprovechar como herramienta de gestión para futuras medidas de planificación de la actividad turística en ambos ámbitos del ecosistema manglar en Tumbes.

1.1 Ubicación de las áreas de estudio

El SNLMT y los manglares de Puerto Pizarro se encuentran ubicados en la bahía de Tumbes. La bahía cuenta con una extensión de 14 millas aproximadamente, y está orientada en dirección al SW. En el extremo Norte de la bahía se encuentra Boca de Capones, que constituye la desembocadura del canal internacional y se forma una entrante que va hacia el mar y forma Punta Capones. Esta bahía se caracteriza por presentar una gran variedad de ecosistemas, tales como playas y manglares, ubicándose en su litoral centros poblados como Puerto Pizarro, El Bendito y Aguas Verdes entre los más importantes (Onern, 1983 citado en Ordinola, et al., 2010).

1.2 Objetivo

Determinar la CCT para los circuitos del SNLMT y para el circuito turístico de Puerto Pizarro, identificando los circuitos turísticos existentes y determinando los niveles de capacidad de carga turística: Física, Real y Efectiva.

2. Metodología

Situación actual y elaboración de mapas cartográficos para cada circuito turístico existente en el SNLMT y en Puerto Pizarro.

Se realizaron visitas a los diferentes circuitos turísticos, embarcando por el sector de Puerto 25 y el sector El Algarrobo en el caso de SNLMT y visita al centro poblado de Puerto Pizarro, para realizar un diagnóstico situacional de la actividad turística e identificar los circuitos turísticos.

Se aplicaron encuestas a turistas, operadores turísticos y presidentes de las asociaciones de turismo.

Obtención de mapas cartográficos de cada circuito turístico, se recorrió cada circuito turístico con apoyo de GPS, se hicieron tomas fotográficas, y filmación de los principales puntos de los trayectos.

2.1 Cálculo de Capacidad de Carga Turística

Para Determinar la CCT de los circuitos turísticos del SNLMT y de Puerto Pizarro, se consideraron aportes de diferentes autores y se definieron los indicadores que se ajustaban a las características del área de estudio para luego utilizarlos en la metodología de Cifuentes (1992):

Capacidad Física

$$CCF = \frac{V}{a} \times s \times t$$

V/a=visitante/área ocupada

S=superficie disponible para uso público

T=tiempo necesario para ejecutar la visita.

Capacidad Real

$$CCR = CCF - (FC_1 + \dots + FC_n)$$

FC = factor de corrección expresado en porcentaje

Capacidad Efectiva

$$CCE = CCR \times \frac{CM}{100}$$

CCR=capacidad real

CM=capacidad de manejo

Capacidad de manejo

La CM en el SNLMT se determinó con los indicadores de sostenibilidad descritos por Morán y Bermejo (2013), cuyos criterios de evaluación definen mejor la administración del área. Para Puerto Pizarro la CM fue determinada por los indicadores de personal, infraestructura y equipamiento, siendo evaluados de acuerdo al método descrito por Marozzi, Lima y Sarmiento (2011).

3. Resultados

3.1 Diagnóstico de los actuales circuitos turísticos existentes en el SNLMT y en Puerto Pizarro

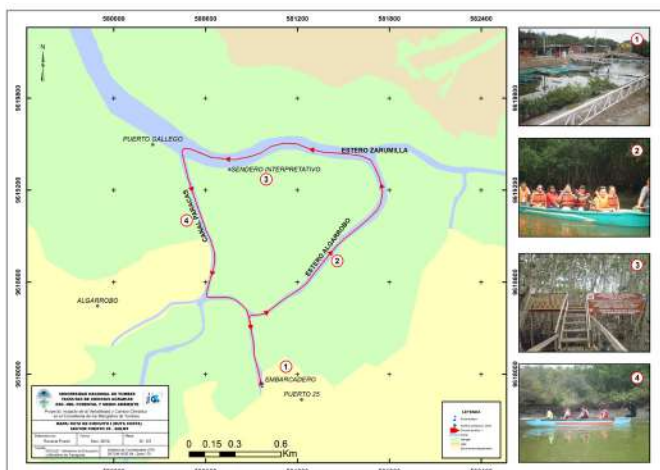
3.1.1 Circuito turístico SNLMT

El recorrido turístico se realiza por los diferentes esteros del SNLMT, observando grandes árboles de mangle. Se puede desembarcar en algunos puntos para avistar aves, observar la extracción de recursos hidrobiológicos como la “concha negra” (*Anadara tuberculosa*) y el “cangrejo del manglar” (*Ucides occidentalis*), según la ruta turística adoptada. También se puede tomar horas de sol en la playa de “Punta Capones” y visitar el centro de interpretación ubicado en el puesto de control El Algarrobo y el sendero interpretativo “El Oscuro” construidos por gestión del ANP y diversas instituciones de soporte (Murrugarra, 2008). En algunas ocasiones se puede visitar los talleres de artesanía de Puerto 25. Este circuito se clasifica en:

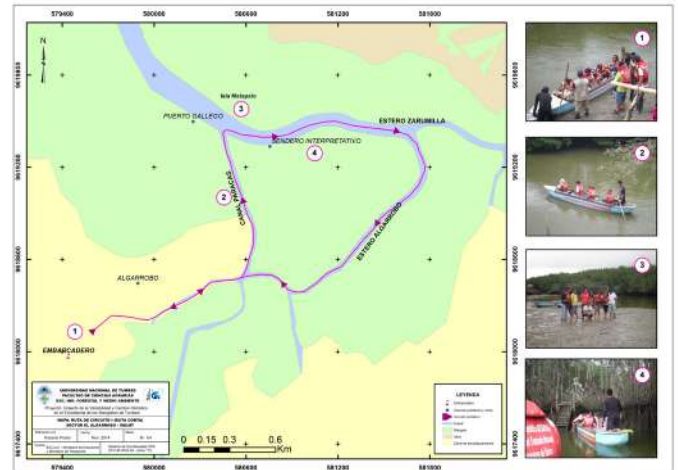
Ruta de circuito I (ruta corta)

El circuito se inicia embarcando por el sector Puerto 25 o por el sector El Algarrobo, recorriendo en canoa el estero Algarrobo o el canal artificial Paracas, llegando hasta el estero Zarumilla, luego se visita el sendero interpretativo El Oscuro y finalmente se retorna a la plataforma de embarque por los diferentes canales de marea. En los Mapas 1 y 2 se observan las rutas de los circuitos turísticos embarcando por el sector Puerto 25 y por el sector El Algarrobo.

El recorrido se realiza en canoa y a remo con una duración de 2 horas aproximadamente y tiene un costo que oscila entre los 100 y 150 nuevos soles, por bote con una capacidad máxima de 8 personas (el costo es por grupo de personas).



Mapa 1. Ruta de circuito I (ruta corta) – sector Puerto 25 – SNLMT

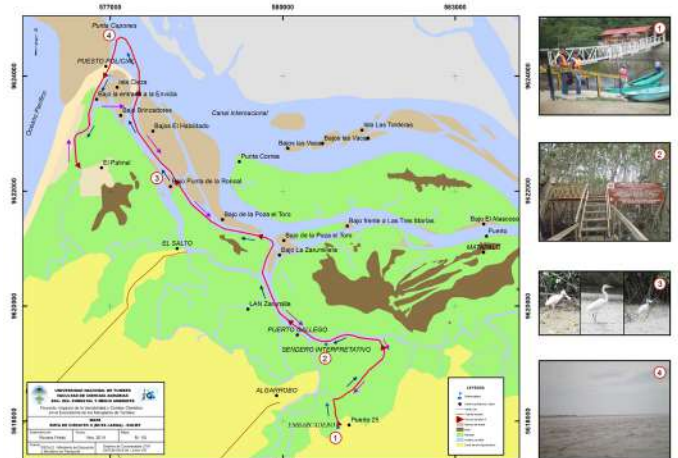


Mapa 2. Ruta de circuito I (ruta corta) – sector El Algarrobo – SNLMT

Ruta de circuito II (ruta larga)

El circuito se inicia embarcando por el sector Puerto 25 o por el sector El Algarrobo, recorriendo en bote el estero Algarrobo o el canal artificial Paracas, el estero Zarumilla, isla Matapalo, isla Las Almejas, isla de los Pájaros, Punta Capones y se visita el sendero interpretativo El Oscuro, finalmente se retorna al sitio de embarque por los diferentes canales de marea. En el Mapa 3 se observa la ruta de circuito II.

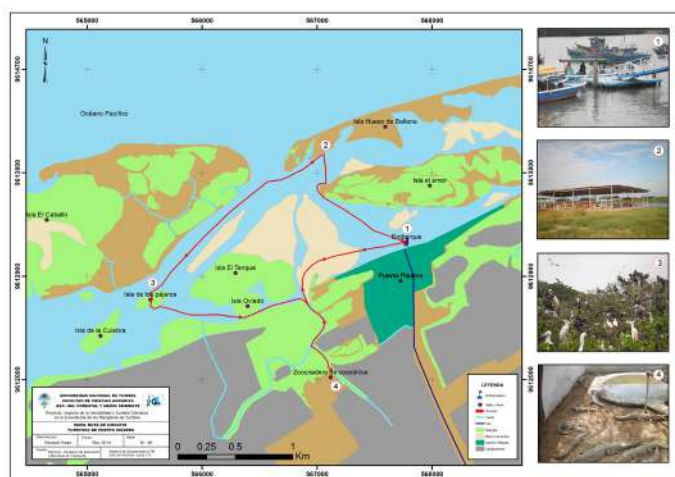
El recorrido se realiza en canoa o en embarcación con motor fuera de borda con una duración de aproximadamente 5 horas y tiene un costo de entre 250 - 300 nuevos soles, por bote con una capacidad máxima de 20 personas (el costo es por grupo de personas). Incluye la demostración de extracción de concha negra (*Anadara tuberculosa*) y cangrejo del manglar (*Ucides occidentalis*), a cargo del mismo operador del bote.



Mapa 3. Ruta de circuito II (ruta larga) – SNLMT

3.1.2. Circuito turístico Puerto Pizarro

En Puerto Pizarro se tiene la opción de visitar el “Centro de Interpretación Turística de Puerto Pizarro”, sin embargo no siempre existe el interés. El circuito se inicia zarpando por la plataforma de embarque para recorrer los diferentes canales de marea de Puerto Pizarro, observando gran cantidad de botes de pesca y árboles de mangle. Se puede desembarcar y tomar horas de sol en la playa de isla Hueso de Ballena, posteriormente se visita isla de Los Pájaros y se puede observar la extracción de recursos hidrobiológicos como la “concha negra” (*Anadara tuberculosa*) y el cangrejo del manglar (*Ucides occidentalis*), para luego concluir el circuito con la visita al Zoocriadero de Puerto Pizarro (Mapa 4).



Mapa 4. Ruta de circuito turístico de Puerto Pizarro

El costo del circuito turístico oscila entre 40 y 120 soles por grupo, dependiendo del tipo de bote que se elija para el transporte acuático y según la amplitud de la marea, se genera diferentes recorridos a los sitios de visita que conforman el circuito turístico de Puerto Pizarro (Figura 1).



Figura 1. Esquema del circuito turístico de los manglares de Puerto Pizarro

Pleamar

Cuando la marea está en su nivel máximo, el recorrido se inicia visitando la isla Hueso de Ballena, luego se continúa recorriendo la isla de Los Pájaros y se finaliza visitando el Zoocriadero de Puerto Pizarro, retornando a la plataforma de desembarque (flechas verdes).

Nivel de la Pleamar media

Cuando está bajando la marea, el operador sugiere visitar primero el Zoocriadero de Puerto Pizarro, luego recorrer la isla de Los Pájaros y culminar en isla Hueso de Ballena para retornar a la plataforma de desembarque (flechas rojas).

Bajamar:

Cuando la marea está en su nivel mínimo no pueden entrar al Zoocriadero de Puerto Pizarro, debido al bajo nivel de agua los botes no pueden hacer su ingreso y tampoco pueden recorrer en bote la isla de Los Pájaros, pero existe la alternativa de que los visitantes puedan desembarcar y caminar por los islotes de isla de Los Pájaros. En otro caso el recorrido se inicia por la isla Hueso de Ballena y es ahí donde tienen la opción de esperar que la marea suba para poder recorrer los sitios antes mencionados y durante ese tiempo realizar actividades recreativas o disfrutar de la oferta que ofrece la isla Hueso de Ballena (flechas celestes).

3.2. Cálculo de los tres niveles de Capacidad de Carga.

El cálculo de CCT se determinó sobre la base de los diferentes factores descritos en la Tabla 1, cuyo resultado es el número de botes por día y por recorrido. En las Tablas 2 y 3 se detalla la CCT calculada para el SNLMT y Puerto Pizarro.

Tabla 1. Factores de corrección para la determinación de la CCT

Factores		SNLMT		Puerto Pizarro
		Rut corta	Ruta larga	
Visita	Tiempo de visita	2.5h	5h	3h
	Horario de visita	8h		10h
Sociales	Personas por bote	Canoa=8 /Bote=21		21
	Espacio por persona	4m ²		15m ²
	Espacio por embarcación	6.5m	8.6	7.5m
	Distancia entre grupos	50m		50m
	Distancia entre botes	50m		50m
Físicos	Superficie disponible	Pto25 = 4554.0 m Tumpis = 5197.0 m	10 706.3 m	5 509.0m
	Erosión	Baja		Baja
	Acceso	Dificultad baja		
Ambientales	Tiempo de Influencia de mareas	4h		4h
	Brillo solar	4h		4h
Biológicos	Perturbación de fauna			Fregata magnifica

Tabla 2. Capacidad de Carga Turística SNLMT

Niveles de CC	Ruta Corta		Ruta larga
	Puerto 25	El algarrobo	Puerto 25
CCF	2242	2559	1992
CCR	29	24	46
CM	0.51		
CCE	15	13	24
CCT(Botes/día)	14		24
CCT(Botes/año)	5065		8702

Tabla 3. CCT del circuito de Puerto Pizarro

Niveles de CC	Isla Hueso Ballena	Isla los Pájaros	Zoocriadero
CCF	793	1235	8
CCR	19	27	4
CM	0.48		
CCT (Botes/día)	9.018	13.128	2
CCT (Botes/año)	3292	4792	718

4. Discusiones

En el cálculo de la CCT de esta investigación se establecieron diferentes factores limitantes como el factor social, brillo solar, accesibilidad, disturbio de fauna y nivel marea. Sin embargo Brenes et al. (2004) utilizaron otros factores limitantes como el factor anegamiento y precipitación en el estudio de CCT del Parque Internacional La Amistad. Asimismo, Flores et al. (2009), en el cálculo de CCT de la Isla Venados de la bahía de Mazatlán, Sinaloa, México, manejó distintos factores de corrección como el factor iluminación solar y psicológico. Cabe resaltar que los factores limitantes se consideran de acuerdo a las características físicas y ambientales del lugar.

5. Conclusiones

El SNLMT presenta dos circuitos turísticos: ruta de circuito I y ruta de circuito II. Se destaca que se ofrece y se demanda mayormente la primera ruta, la otra ruta es menos conocida por los visitantes y/o resulta más onerosa, o el turista no siempre dispone de la cantidad de horas necesarias para dicha visita. La capacidad turística en la ruta de circuito I y II en el SNLMT es de 14 y 24 botes al día, respectivamente; haciendo un total de 5065 y 8702 botes al año, respectivamente. Sin embargo, el ingreso actual (promedio de los años 2005 al 2013) al SNLMT es de 1331 visitas al día, lo que se traduce a 166 canoas al año para la ruta de circuito I y 63 botes al año (bote con motor fuera de borda) para la ruta de circuito

II concluyendo que el ingreso actual es menor a la CCT calculada.

El circuito de los manglares de Puerto Pizarro consiste en visitar tres sitios específicos: Isla Hueso de Ballena, Isla de Los Pájaros y el Zoocriadero de Puerto Pizarro, pero según la dinámica de la marea (pleamar, pleamar media y bajamar), origina tres recorridos diferentes.

La capacidad de carga turística en isla Hueso de Ballena, isla de los Pájaros y Zoocriadero de Puerto Pizarro es 9, 13, y 2 botes al día, respectivamente; haciendo un total de 3292, 4792 y 718 botes al año, considerándose los tres sitios como parte de un solo circuito, donde se obtuvo que la CCT es 8801 botes al año y el ingreso actual de los visitantes (promedio de los años 2012 y 2013) es de 9860 botes al año, concluyendo que el ingreso actual es mayor a la CCT calculada.

6. Recomendaciones

Los valores de CCT tanto del SNLMT como de Puerto Pizarro están calculados sobre la base de una serie de observaciones de las diferentes salidas de campo descritos en cada uno de los capítulos donde se calcula dichos valores. Estas observaciones deben tenerse en cuenta al momento de interpretar dichos valores.

Es indispensable realizar el monitoreo de los impactos del turismo dentro de las áreas de estudio en base a las cifras de visitantes y botes calculadas en este estudio. Este monitoreo llevará a determinar si dichas cifras son en la práctica, realistas y se podrá incorporar en el futuro factores de corrección nuevos que ayuden a determinar un mejor número de visitantes dentro del SNLMT y Puerto Pizarro, así se podría mejorar la actividad turística y evitar alteraciones en el ecosistema manglar.

7. Agradecimientos

Al Proyecto “Impacto de la Variabilidad y Cambio Climático en el ecosistema Manglares de Tumbes”, ejecutado por el Instituto Geofísico del Perú – IGP, con el financiamiento de International Development Research Centre IDRC (www.idrc.ca).

Del mismo modo agradecimiento extendido, para el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas (SERNANP) - Jefatura del Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes. Por los permisos y facilidades otorgadas para el desarrollo de esta investigación a la Mg. Alejandra Martínez Grimaldo y al Ing. Mg. Luis Alberto Bermejo Requena, por su asesoramiento, su tiempo y sus valiosas observaciones.

8. Bibliografía

Amador, E., Cayot, L., Cifuentes, M., Cruz, E., y Cruz, F. 1996. *Determinación de la Capacidad de Carga Turística en los sitios de visita del Parque Nacional Galápagos*. Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales y Vida Silvestre. Ecuador.

Brenes, O., Castro, K., Jiménez, V., Mora, A., y Mejía, I. 2004. *Determinación de la Capacidad de Carga Turística del Parque Internacional La Amistad*. Centro de investigación científico tropical. Costa Rica: TNC y ACLAP-MINAE.

Cifuentes, M., 1992. *Determinación Capacidad de Carga Turística en áreas protegidas*. Programa de Manejo Integrado de Recursos Naturales. Informe 194. Turrialba, Costa Rica, 28 p.

Marozzi, P., Lima, J., y Sarmiento, M. 2011. *Caracterización de los visitantes y Determinación de la Capacidad de Carga Turística en el Parque Nacional Los Cardones (PNLC)*. Salta, Argentina.

Morán, A., y Bermejo, L., 2013. *Determinación de la Sostenibilidad Turística del Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes Puerto 25-provincia de Zarumilla - Año 2012*. Perú: Universidad Nacional de Tumbes.

Murrugarra, F., 2008. *Diagnóstico de potencial Turístico del SNLMT*. Informe de consultoría presentado a MEDA Perú. Tumbes, Perú.

Ordinola, E., López, E., Gonzales, I., Montero, P., Agurto, K., Torres, E., Inga, C., y Vera, M. 2010. *Delimitación y caracterización de bancos naturales de invertebrados bentónicos comerciales y áreas de pesca artesanal en el litoral de Tumbes*. Perú: Imape.

IDENTIFICACIÓN DE IMPACTOS DE LA ACTIVIDAD AGRÍCOLA PARA EL PERÍODO 1985-2014 EN LA ZONA DE AMORTIGUAMIENTO DEL SNLMT, DISTRITOS DE AGUAS VERDES Y ZARUMILLA¹

IDENTIFYING IMPACTS OF AGRICULTURAL ACTIVITY FOR THE PERIOD 1985-2014 IN THE BUFFER ZONE OF SNLMT, ZARUMILLA AND AGUAS VERDES DISTRICTS

Eduard Alder Feijoo Fox
Universidad Nacional de Tumbes
Facultad de Ciencias Agrarias
alder_1706@hotmail.com

Asesores: Mag. Luis Bermejo Requena;
Mag. Alejandra Martínez
Subdirección de Geofísica y Sociedad
IGP

Resumen

Este trabajo de investigación tuvo el objetivo de determinar los impactos que el sector agrícola viene generando dentro del bosque de la Zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes – SNLMT.

Para ello, se identificaron cinco sectores agrícolas en la Zona de Amortiguamiento: Sector Pampa la Soledad, La Turumilla, Nueva Esperanza (distrito de Zarumilla) y los sectores de Los Ceibos y Chacra González (distrito de Aguas Verdes). En cada uno de ellos se evaluó el área cultivada, se identificaron los principales cultivos, y se realizó la respectiva identificación de impactos ocasionados en cada uno de ellos. El método empleado para la identificación y evaluación de los impactos ocasionados por la actividad agrícola fue el método de Vicente Conesa (2010).

Se determinó que el sector que presenta mayor impacto es Los Ceibos, seguido por Chacra González, Pampa la Soledad, La Turumilla y Nueva Esperanza. Además, se identificó que la introducción del cultivo de arroz está ocasionando mayor impacto, seguido del cultivo de uva y por último el cultivo de ciruela.

Se concluye que el bosque seco que se encuentra en la Zona de Amortiguamiento del SNLMT viene siendo impactado por el sector agrario. El componente ambiental que viene siendo impactado por las actividades agrícolas es la flora y el suelo, y en el análisis temporal se percibe una ampliación de la actividad agrícola en el tiempo de 147.87 ha de uso del suelo sobre la Zona de Amortiguamiento del SNLMT para el periodo de 1985 al 2014.

Palabras clave: zona de amortiguamiento, agricultura, Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes

Abstract

The research was aimed to determine the significant impacts that the agricultural sector is generating in the forest of the buffer zone of the National Sanctuary of Tumbes Mangroves - SNLMT.

For this, five agricultural sectors were identified in the buffer zone: Sector Pampa la Soledad, La Turumilla, Nueva Esperanza (district of Zarumilla) and sectors and Chacra Los Ceibos González (Aguas Verdes district). In each one, the acreage were assessed, the main crops were identified and the respective impacts caused by agriculture were evaluated. The method used for the identification and assessment of impacts caused by agricultural activity was the method of Vicente Conesa (2010).

It was determined that Los Ceibos sector was the one with greater impacts, followed by Chacra Gonzales, Soledad Pampa, La Turumilla and Nueva Esperanza. Furthermore, it was identified that the introduction of the rice is causing more negative impacts, followed by the introduction of grapes, and finally plum.

It is concluded that the forest located in the buffer zone of the SNLMT is being impacted by the agricultural sector. The environmental components that has been more impacted by agricultural activities are the flora and soil, and the temporal analysis of the agricultural activity extension showed an increase of 147.87 hectares on the buffer zone of SNLMT for the period 1985 to 2014.

Keywords: buffer zone, farming, National Mangrove Sanctuary of Tumbes

¹Tesis con la cual se obtuvo el grado de Ingeniero Forestal y Medio Ambiente, en el marco del proyecto "Impacto de la Variabilidad y Cambio Climático en el Ecosistema de Manglares de Tumbes" ejecutado por el IGP.

1. Introducción

La actividad agrícola es una de las principales actividades económicas que se desarrolla en el departamento de Tumbes, teniendo como principales cultivos al banano y el arroz. La Zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional los Manglares de Tumbes no es ajena al desarrollo de esta actividad, y tiene como principales cultivos a la ciruela y al tamarindo. Los impactos de esta actividad en la zona de amortiguamiento del SNLMT han sido poco estudiados, y no se conoce en profundidad la forma en que esta actividad afecta al bosque seco, considerando que esta zona tiene principal función minimizar los posibles impactos que pueden afectar el Área Natural Protegida.

El presente estudio busca identificar los posibles impactos que se vienen realizando dentro de la Zona de Amortiguamiento – ZA por parte del sector agrícola, y determinar el estado actual en que se encuentra el área de estudio. Los primeros resultados muestran que existe una fuerte diferenciación entre los tipos de agricultura que se desarrollan en la ZA: una agricultura con cultivos para autoconsumo para un mercado muy local como la ciruela, y otra con cultivos comerciales como arroz y uvas con distintas demandas hídricas y de terreno.

2. Desarrollo

Identificación de los servicios ecosistémicos
Para la identificación de los servicios ecosistémicos se realizó una matriz con los principales servicios identificados en ecosistemas semejantes al bosque seco del SNLMT, luego se realizó la verificación in situ para corroborar la existencia de los servicios identificados que se encuentran en la ZA del santuario. Asimismo, se adoptó el marco conceptual del MEA (2005).

2.1. Georreferenciación de parcelas agrícolas cultivadas en la ZA del Santuario

Para la respectiva georreferenciación de las parcelas agrícolas cultivadas de los sectores agrícolas (Pampa la Soledad, La Turumilla, Nueva Esperanza, Los Ceibos y Chacra González) que se encuentran dentro de la ZA del Santuario, se realizaron tres salidas de campo; asimismo se identificaron las diferentes especies agronómicas que son cultivadas dentro del área de estudio.

2.2. Identificación y valorización de los impactos ambientales en el ecosistema del bosque seco de la ZA del Santuario

Para la identificación y valorización de los impactos ambientales se utilizó la Guía Metodológica para la identificación del Impacto Ambiental de

Vicente Conesa (2010), quien propone una matriz de importancia para la calificación de impactos ambientales de manera cualitativa.

2.3. Evaluación de impactos ambientales con el método de Vicente Conesa

La identificación, valoración y evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad Agrícola en la ZA del Santuario se desarrolló en los siguientes pasos:

Identificación de las actividades del proyecto

En la Tabla 1 se reseñan estas actividades.

Tabla 1. Identificación de las actividades del Proyecto

Preparación del terreno /Instalación	
Desbroce y desmonte	A ₁
Quema de vegetación	A ₂
Arado y movimiento de maquinaria	A ₃
Siembra y Manejo de cultivo	
Riego	A ₄
Siembra	A ₅
Aplicación de fertilizantes	A ₆
Quema de vegetación	A ₇
Aplicación de plaguicidas	A ₈
Riego	A ₉
Descarga de aguas residuales	A ₉
Cosecha	
Cosecha	A ₁₁
Transporte del producto	A ₁₂
Quema de pajilla de arroz	A ₁₃

Identificación de los factores ambientales del proyecto

De acuerdo con la metodología descrita, se propone una estructura jerárquica tipo árbol para la representación del medio ambiente:

- Sistema ambiental,
- Subsistema
- Componente Ambiental

Asignándole una medida de su importancia relativa en unidades de importancia ponderada (UIP) a cada componente ambiental. Para facilitar esta tarea, se asignó 1000 UIP al nodo superior del árbol y después se definieron los pesos de los nodos inferiores como un porcentaje del peso del nodo inmediato superior, tomando en cuenta la fragilidad del componente ambiental, su valor de conservación o mérito, sensibilidad a los impactos, tamaño o dimensión de las variables, su importancia relativa el ámbito de referencia o zona de influencia que se considere.

El sistema ambiental es el medio ambiente en el que se desarrolló el proyecto y representa el 100 % de las UIP, éste a su vez, se ha dividido en subsistemas o medios, a los que se les ha ponderado de la siguiente forma (Tabla 2):

- 20 % de las UIP al medio inerte, por la importancia que representa para el ecosistema la calidad del suelo.
- 55 % de las UIP al medio biótico puesto que la flora y la fauna terrestre son un recurso valioso.
- 25 % de las UIP restantes se han asignado al medio perceptual y socioeconómico, factores que influyen en el bienestar social y la calidad de vida.

Tabla 3. CCT del circuito de Puerto Pizarro

SISTEMA	SUBSISTEMA	COMPONENTE GENERAL	COMPONENTE ESPECÍFICO	UIP
Medio físico	Medio inerte	Aire	Calidad de aire C ₁	100
		Suelo	Calidad del suelo C ₂	100
		Total medio inerte		200
	Medio biótico	Ecosistemas terrestres	Flora terrestre C ₂	200
			Fauna terrestre C ₃	200
		Total medio biótico		400
	Medio perceptual	Paisaje intrínseco	Paisaje C ₄	150
		Total medio perceptual		150
	Total medio físico			750
Medio socioeconómico	Medio económico	Economía	Empleo C ₅	150
			Desarrollo agrícola C ₆	100
		Total medio económico		250
	Total medio socioeconómico y cultural			250
Total medio ambiente afectado				1000

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Conesa, 2010.

Identificación de impactos ambientales del proyecto

Una vez conocidas las actividades del proyecto, el entorno que lo rodea y la capacidad de acogida del mismo, se estuvo en condiciones de iniciar la identificación de impactos.

Calificación y valoración de los impactos ambientales del proyecto

En la matriz de impactos se identificaron las actividades que pueden causar impacto sobre uno o varios componentes ambientales, determinando la importancia de a cada interacción actividad-componente.

Identificación de los componentes ambientales

Partiendo de la evaluación del medio ambiente de la zona de influencia donde se desarrolla la actividad agrícola, se identificaron los componentes ambientales más relevantes del medio ambiente (Tabla 3).

Tabla 3. Identificación de los componentes ambientales

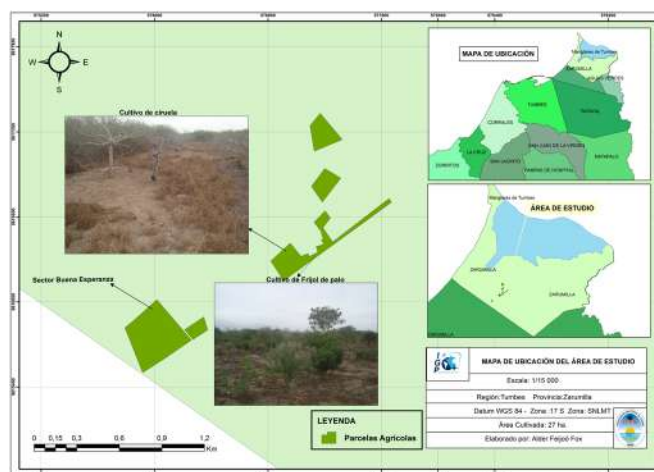
Ambiente físico	C_i
Calidad del aire	C ₁
Calidad del suelo	C ₂
Paisaje	C ₃
Ambiente biológico	C_i
Flora terrestre	C ₄
Fauna terrestre	C ₅
Ambiente socioeconómico	C_i
Empleo	C ₆
Sector agrario	C ₇

Para la interpretación se utilizó el Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor del Ministerio de Agricultura (2009).

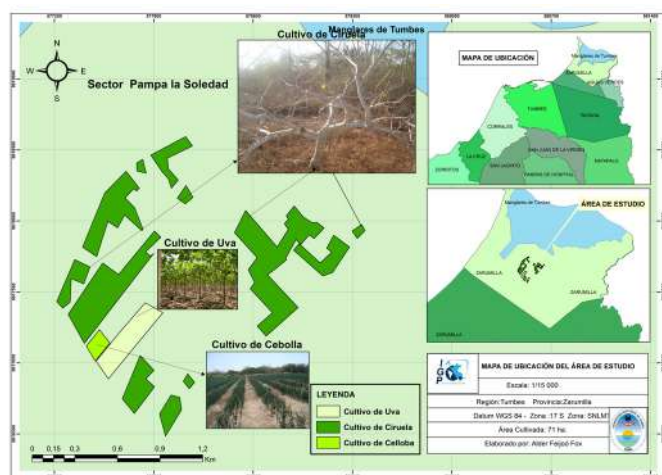
Para el estudio temporal de imágenes satelitales del periodo 1985 – 2014, el procesamiento de dicha imágenes se realizó en las instalaciones del Instituto Geofísico del Perú, en Lima.

3. Resultados

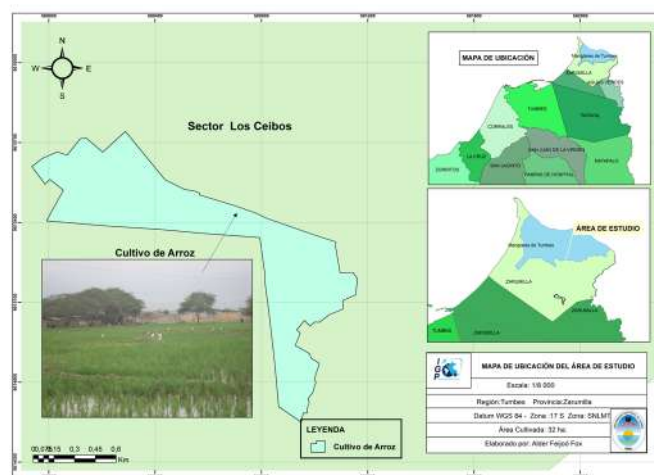
El Bosque seco de la Zona de Amortiguamiento del SNLMT, viene siendo alterado por la actividad agrícola, identificándose 5 sectores agrícolas (ver Mapas 1, 2, 3, 4 y 5), siendo el sector Los Ceibos el más alterado.



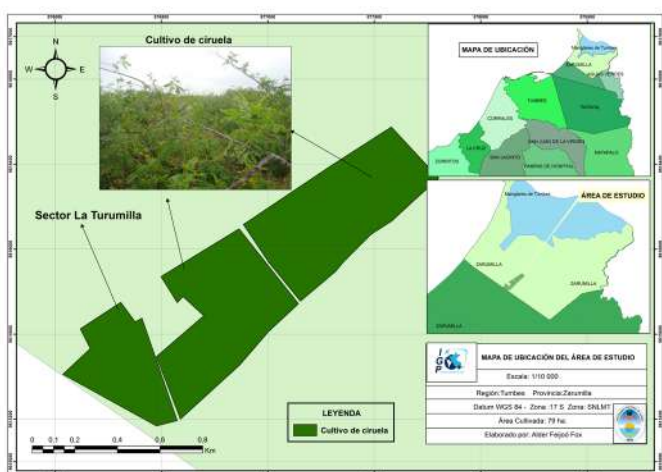
Mapa 3. Especies identificadas en el sector Nueva Esperanza



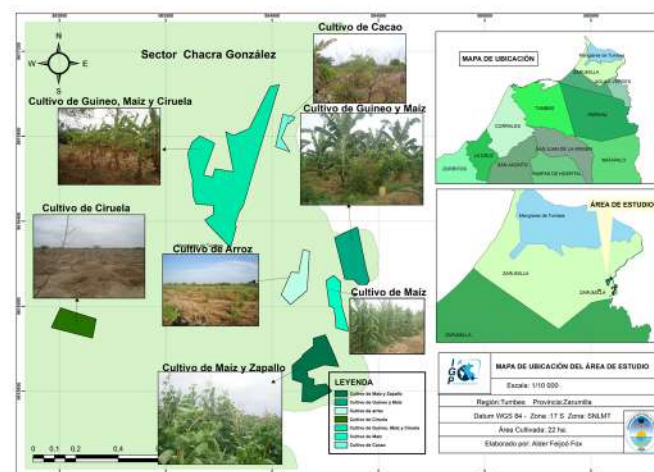
Mapa 1. Especies identificadas en el sector Pampa la Soledad



Mapa 4. Especies identificadas en el sector Los Ceibos



Mapa 2. Especies identificadas en el sector La Turumilla



Mapa 5. Especies identificadas en el sector Chacra González

En el análisis temporal se identifica una ampliación de la actividad agrícola en el tiempo, siendo así que según la clasificación de la imagen Landsat de 1985 da un área de 116.37 ha de uso agrícola (Figura 1) y la clasificación de la imagen Landsat del 2014 da un área de 264.24 ha de uso agrícola (Figura 2).

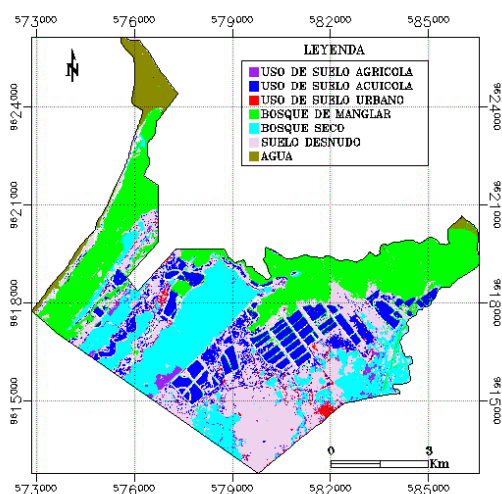


Figura 1. Imagen de clases de 1985
Fuente: Príncipe y Céspedes, 2014.

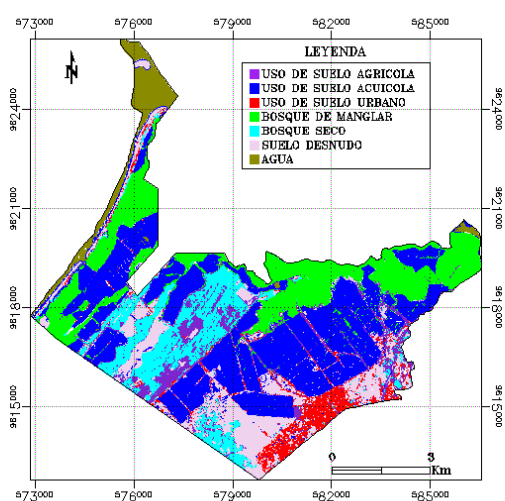


Figura 2. Imagen de clases de 2014
Fuente: Príncipe y Céspedes, 2014.

4. Discusión

Los resultados del presente estudio de Identificación de impactos a causa de la actividad agrícola en la ZA del SNLMT, se han comparado con los resultados de aquellos informes o estudios similares según se muestra a continuación:

A. En el presente estudio se identificaron 5 sectores agrícolas, número inferior a lo reportado por Sotelo (2009), quien identificó 8 sectores agrícolas dentro de la ZA del santuario.

B. Según nuestros resultados, una de las principales actividades que viene alterando el bosque seco de la ZA es el desbroce o desmonte también conocido como la tala o deforestación, lo cual coincide con lo reportado por Inrena (2007), el cual cita que el bosque seco viene siendo deforestado, con el objetivo de instalar parcelas agrícolas. También Parks Watch (2003), cita que el bosque seco de la ZA viene siendo afectada por la tala y quema por parte de grupos de agricultores, para luego continuar con el proceso de instalación de parcelas agrícolas, y coincide con lo reportado por MEDA (2008), quien menciona que la agricultura viene alterando el ecosistema del bosque seco.

C. Se ha identificado que el área cultivada es 280 ha Aprox., en la ZA, sin embargo en el corredor biológico de la ZA (conformado por los sectores agrícolas de: Pampa la Soledad, La Turumilla y Buena Esperanza) el área cultivada es de 219 ha Aprox. resultado superior a lo reportado por Clavijo y Neyra (2009) que fue de 121.09 ha en el corredor biológico de la ZA del SNLMT.

5. Conclusiones

En la ZA del santuario se identificaron los siguientes servicios ecosistémicos: servicios de provisión (provisión de alimentos, materias primas y recursos medicinales), y servicios de soporte (hábitats para las especies).

Se identificaron cinco sectores agrícolas: sector Pampa la Soledad, que tiene como cultivo principal a la ciruela y dos nuevos cultivos (uva y cebolla); sector La Turumilla, con el cultivo de ciruela de mayor predominancia seguido del tamarindo; sector Nueva Esperanza, con el cultivo de ciruela como principal; sector Los Ceibos con el cultivo de arroz como principal; y finalmente en el sector Chacra González se identificaron cultivos como el arroz, banano, maíz, ciruela, camote, yuca, ciruela, etc.

De los cinco sectores identificados dentro de la ZA, el que tiene un mayor grado de impacto es el sector Los Ceibos o conocido también como Alberto Fujimori y 28 de Julio que tiene un área cultivada de 32 ha Aprox. Los principales componentes ambientales afectados son el suelo, seguido de la flora, el paisaje y flora. En este sector no se encuentra la presencia de bosque seco, solo encontramos el cultivo de arroz.

El incremento del terreno para la actividad agrícola es de 147.87 en la zona de amortiguamiento del SNLMT para el periodo de 1985 al 2014.

6. Recomendaciones

En los sectores donde se ha identificado una mayor alteración de los componentes ambientales se debe realizar campañas de difusión y sensibilizar a los agricultores sobre la importancia de la ZA.

El bosque seco de la ZA y el ecosistema manglar, mantienen una interacción, que se debería ser más estudiada.

Los tipos de cultivos que se deben desarrollarse preferentemente deben de ser los cultivos perennes.

7. Agradecimientos

Al Instituto Geofísico del Perú por brindarme las facilidades para desarrollar mi tema de tesis.

A la Mag. Alejandra Martínez Grimaldo, por estar a cargo de mi capacitación y a todo el personal quienes han tenido mucho que ver con en la elaboración y ejecución del trabajo de investigación.

8. Bibliografía

Clavijo, A., y Neyra, P., 2009. *Diagnóstico situacional del uso de la tierra en los sectores los Tumpis, Pampa la Soledad, la Turumilla y Buena Esperanza inmersos en la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional los Manglares de Tumbes. Tumbes-Perú.*

Conesa, F., 2010. *Guía metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental 4^a.ed. Madrid.*




INRENA, 2007. *Plan Maestro del SNLMT, 2007- 2011. Tumbes – Lima.*

MEDA ,2008., *Diagnóstico participativo del bosque seco de llanura de la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional Los Manglares de Tumbes, sectores Pampa La Soledad y La Turumilla provincia de Zarumilla, Tumbes – Perú*

Parks Watch, 2003. *Perfil de Área Protegida “Santuario Nacional los Manglares de Tumbes. Tumbes- Perú”.*

Príncipe, E. y Céspedes., L., 2014. *Análisis del territorio de la cobertura manglar. En: Instituto Geofísico del Perú, 2014. Gestión sostenible de recursos naturales en el ecosistema de manglares de Tumbes. Informe Técnico Especial. Volumen I. Pág. 8-33.*

Sotelo, 2009. *Diagnóstico situacional sobre la tenencia y ocupación de las tierras que conforman la zona de amortiguamiento del Santuario Nacional los Manglares de Tumbes. Informe Final. MEDA. Tumbes, Perú.*

 <http://www.facebook.com/igp.peru>
 http://twitter.com/igp_peru
 https://www.youtube.com/c/igp_videos



Calle Badajoz 169 Mayorazgo - IV Etapa Ate Vitarte
Central Telefónica: 317-2300