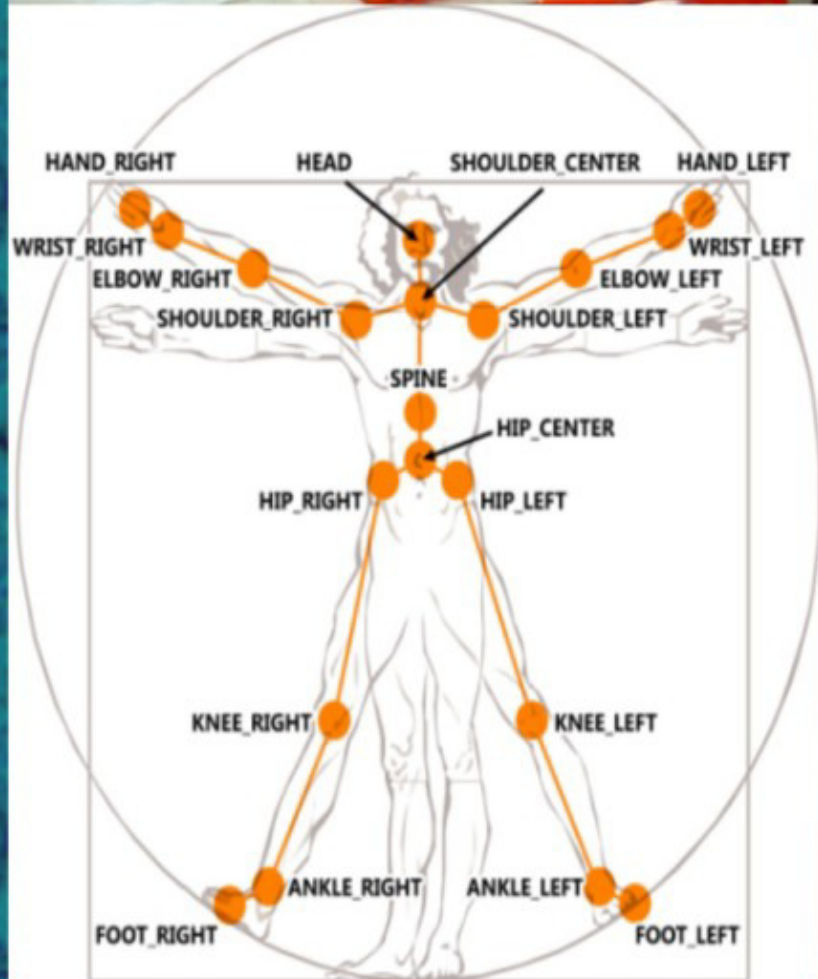


Revista de Investigaciones

Universidad del Quindío



UNIVERSIDAD
DEL QUINDÍO

Revista de Investigaciones
Universidad del Quindío
Septiembre - Diciembre de 2015
Vol.2 N° 27 PP 109

ISSN Para Impresión: 1794-631x
ISSN Electrónico: 2500-5782



UNIVERSIDAD
DEL QUINDÍO

REVISTA DE INVESTIGACIONES UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO

Rev. Invest. Univ. Quindío	Volumen 2	Número 27	P.P. 109	Sept-Dic 2015	ISSN 1794-631X
-------------------------------	--------------	--------------	-------------	------------------	-------------------

Armenia – Quindío, Colombia
RIUQ 2015

Incluida en los centros de documentación y bases de datos Internacionales
PUBLINDEX de COLCIENCIAS – Categoría C
LATINDEX en Catálogo
EBSCO
HEVILA



© Derechos reservados de autor

Queda prohibida la reproducción parcial o total del material gráfico y editorial de la publicación sin previa autorización escrita del editor.

Portada: XXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXX

Diagramación: Vicerrectoría de Investigaciones, Luis Alberto Romero
Impresión: Litoskrybe

UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO

Vicerrectoría de Investigaciones

Carrera 15 calle 12 Norte

Telefonos (096) 7359305 e-mail: riuq@uniquindio.edu.co

Open Journal System: <http://www.riuq.edu.co>

Armenia Quindío Colombia



EDITOR EN JEFE

Jhon Carlos Castaño Osorio. Ph.D.
Universidad del Quindío

COMITÉ EDITORIAL

Eunice Ríos Vásquez. Ph.D.
Universidad del Quindío

Patricia Landázuri. Ph.D.
Universidad del Quindío

Liliana Tirado Mejia. Ph.D.
Universidad del Quindío

Mercedes Girón Vanderhuck. Ph.D
Universidad del Quindío

Luis Alberto Romero. Profesional
Universidad del Quindío

COMITÉ CIENTÍFICO

Ana Ladio. Ph.D
Universidad Nacional Comahue, Argentina

Misael Cortés Rodríguez. Ph.D
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín- Colombia

Luis Sarmiento. Ph.D
Instituto de Medicina Tropical Pedro Kouri,
La Habana- Cuba

Fidel Ángel Nuñez Fernández. Ph.D
Instituto de Medicina Tropical Pedro Kouri,
La Habana- Cuba

José Luis Martínez. M.S
Universidad de Santiago de Chile, Chile

Luís Puente Díaz. Ph.D
Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile

CONTENIDO

	Página
Editorial	8
IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE POSIBLES LESIONES MAMARIAS EN MAMO- GRAFÍA DIGITAL.	9
Any Estefany Ruiz Duque , Diana Carolina Arboleda Gómez , Jenny Kateryne Aristizábal Nieto.	
DETECCIÓN DE POSES DE LAS MANOS USANDO DESCRIPTORES LBP.	16
Cristhian Torres Arboleda, Marcela Iregui Guerrero.	
CONTROL DE UN ROBOT HUMANOIDE UTILIZANDO MOTION RETARGETING.	23
Juan Felipe Medina Lee, Luis Miguel Capacho Valbuena.	
SISTEMA EMBEBIDO PARA EL RECONOCIMIENTO DE ESCRITURA SOBRE PLATA- FORMA LINUX EMBEBIDO.	29
Freddy Rodrigo Mendoza Ticona.	
RECONSTRUCCIÓN DE CAMPOS DE LUZ A PARTIR DE PROYECCIONES 2D BASADO EN MUESTREO COMPRESIVO	34
Kareth León, Laura V. Galvis, Henry Arguello Fuentes.	
COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DISPERSIVOS DE LA FIBRA ÓPTICA EN UN SISTE- MA IM-DD USANDO ECUALIZACIÓN LMS Y MLSE.	40
Roobert David Gallego Ruiz, Yeison David Sánchez Sierra, Jhon James Granada Torres, Ana María Cárdenas Soto, Neil Guerrero González.	
ASISTENTE DOMÓTICO A DISTANCIA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE RECONOCIMIENTO DE VOZ.	48
Jairo A. Vélez Pérez, José D. Bejarano Berrio, Carlos E. Arrieta Monsalve, Edilson Delgado Trejos.	
DETECCIÓN DE CAMBIOS NO SUPERVISADA DE IMÁGENES SAR PARA EL SEGUI- MIENTO DEL COMPORTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INUNDACIONES EN COLOMBIA.	54
Jonathan Avendaño P., Jorge I. Padilla, Jhon E. Vera, Jaime A. Parra.	
MÉTODO GEOESTADÍSTICO DE RESTAURACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LAND- SAT EN TERRITORIOS NUBLADOS.	62
Victor Flores Benites.	
EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS FRECUENCIALES EN REGISTROS EEG A PAR- TIR DE LA TRANSFORMADA WAVELET.	69
Alexander Jaramillo García, Daniel F. Acosta García, John F. Ochoa Gómez.	
PONDERACIÓN ÓPTIMA DE LAS ÁREAS EVALUADAS EN LA PRUEBAS SABER 11, PARA CALCULAR EL PUNTAJE DE INGRESO A LA UNIVERSIDAD.	75
Hurtado T, L. H.; García G, M.D.; López C, D.	

DESARROLLO Y EVALUACION DE METODOS DE DISRUPCION CELULAR TERMICA Y QUIMICA PARA LA OBTENCION DE BIOCOMBUSTIBLES Y BIOPRODUCTOS.	81
Angel González Delgado, Yeimmy Peralta Ruiz, Viatcheslav Kafarov.	
PREVALENCIA DE FACTORES DE RIESGO CEREBRO-CARDIOVASCULARES EN ESTUDIANTES DE SALUD, ARMENIA-QUINDÍO 2014.	91
Diana Patricia Londoño Buriticá, Jheimy Jackeline García Castañeda.	
AJUSTE DE CURVAS DE DEGRADACIÓN DE MÓDULO DE CORTANTE Y RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO PARA LOS SUELOS DE CENIZAS: CASO ARMENIA (COLOMBIA).	102
Carlos Arturo García Ocampo, Hugo Monsalve Jaramillo, Diego Andrés Peña Ceballos, Mario Andrés Pareja Soto.	

CONTENT

	Page
Editorial	8
BREAST LESIONS DETECTION IN DIGITAL MAMMOGRAPHY AN AUTOMATED PRE-DIAGNOSIS.	9
Any Estefany Ruiz Duque , Diana Carolina Arboleda Gómez , Jenny Kateryne Aristizábal Nieto.	
DETECTION OF HAND LBP DESCRIPTORS.	16
Cristhian Torres Arboleda, Marcela Iregui Guerrero.	
CONTROL OF A HUMANOID ROBOT USING MOTION RETARGETING.	23
Juan Felipe Medina Lee, Luis Miguel Capacho Valbuena.	
EMBEDDED SYSTEM FOR THE RECOGNITION OF WRITING ON EMBEDDED LINUX.	29
Freddy Rodrigo Mendoza Ticona.	
LIGHT FIELD RECONSTRUCTION FROM 2D PROJECTIONS BY COMPRESSIVE SENSING.	34
Kareth León, Laura V. Galvis, Henry Arguello Fuentes.	
OPTICAL FIBER IMPAIRMENTS COMPENSATION IN A IM-DD SYSTEM USING LMS AND MLSE EQUALIZATION.	40
Roobert David Gallego Ruiz, Yeison David Sánchez Sierra, Jhon James Granada Torres, Ana María Cárdenas Soto, Neil Guerrero González.	
WIRELESS DOMOTIC ASSISTANT USING SPEECH RECOGNITION TECHNIQUES.	48
Jairo A. Vélez Pérez, José D. Bejarano Berrio, Carlos E. Arrieta Monsalve, Edilson Delgado Trejos.	
DETECTION OF UNSUPERVISED SAR IMAGES CHANGES FOR THE MONITORING OF THE BEHAVIOR AND ANALYSIS OF FLOODS IN COLOMBIA.	54
Jonathan Avendaño P., Jorge I. Padilla, Jhon E. Vera, Jaime A. Parra.	
GEOSTATISTICAL METHOD OF SATELLITAL IMAGE RESTORATION LANDSAT IN CLOUDY TERRITORIES.	62
Victor Flores Benites.	
EXTRACTION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS FROM EEG REGISTNES USING WAVELET TRANSFORM.	69
Alexander Jaramillo García, Daniel F. Acosta García, John F. Ochoa Gómez.	
OPTIMAL WEIGHTING ON ASSESSED SUBJECT AREAS OF SABER 11 TEST TO COMPUTE THE ADMISSION SCORE	75
Hurtado T, L. H.; García G, M.D.; López C, D.	

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF THERMAL AND CHEMICAL MICROALGAE CELL DISRUPTION METHODS FOR BIOFUELS AND BIOPRODUCTS PRODUCTION.	81
Angel González Delgado, Yeimmy Peralta Ruiz, Viatcheslav Kafarov.	
PREVALENCE OF BRAIN-RELATED CARDIOVASCULAR RISK FACTORS IN HEALTH STUDENTS, ARMENIA-QUINDÍO 2014.	91
Diana Patricia Londoño Buriticá, Jheimy Jackeline García Castañeda.	
SETTING DEGRADATION CURVES SHEAR MODULUS AND DAMPING RATIO FOR SOIL ASH IN ARMENIA (COLOMBIA).	102
Carlos Arturo García Ocampo, Hugo Monsalve Jaramillo, Diego Andrés Peña Ceballos, Mario Andrés Pareja Soto.	

IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE POSIBLES LESIONES MAMARIAS EN MAMOGRAFÍA DIGITAL

BREAST LESIONS DETECTION IN DIGITAL MAMMOGRAPHY AN AUTOMATED PRE-DIAGNOSIS

Any Estefany Ruiz Duque¹, Diana Carolina Arboleda Gómez¹, Jenny Kateryne Aristizábal Nieto¹

¹ Grupo de Investigación en Bioinstrumentación e Ingeniería Clínica Programa de Bioingeniería
Universidad de Antioquia UdeA.

Recibido: 1 Octubre de 2015

Aceptado: 15 Diciembre de 2015

*Correspondencia del autor: Jenny Kateryne Aristizabal Nieto; E-mail: jenny.aristizabal@udea.edu.co

RESUMEN

Una de las causas de muerte más comunes entre la población femenina a nivel mundial es el cáncer de seno, además de ser una de las formas de cáncer más prevalente entre otros tipos de cáncer. El diagnóstico temprano y oportuno es un factor determinante para un tratamiento adecuado de esta enfermedad, incrementando las probabilidades de supervivencia de quienes lo padecen. Con el fin de mejorar la eficiencia y la efectividad del diagnóstico del cáncer de seno, se implementó un sistema de análisis de imágenes, cuyo propósito es servir de apoyo para los radiólogos en la detección de lesiones en las mamografías.

Con el fin de encontrar e identificar lesiones mamarias en las mamografías, se implementaron técnicas de segmentación de imágenes en una Región de Interés (ROI), la cual está relacionada con el área donde está concentrada la densidad mamaria. La densidad mamaria se define como el área más brillante en la imagen mamográfica y que está compuesta por tejido fibroglandular y adiposo; es allí donde es probable que las lesiones mamarias sean expuestas. Este estudio provee una metodología dividida en dos etapas, usando dos técnicas de segmentación principales: 1- una técnica de crecimiento de regiones y 2- una técnica de división y fusión de regiones. Este estudio, además, provee una descripción completa del análisis de las imágenes y las herramientas utilizadas para el desarrollo de los algoritmos.

Palabras claves: Cáncer de seno; mamografías; lesiones mamarias; análisis de imágenes; segmentación basada en regiones.

ABSTRACT

Breast cancer is one of the most common causes of death in the female population worldwide and one of the most prevalent cancers among other types of cancer. An early and adequate diagnosis is a key factor for an appropriate treatment, increasing the probability of survival. In order to enhance the efficiency and effectiveness of a diagnosis, an image analysis system was implemented; its purpose was to provide support for radiologists in detection of lesions from mammograms.

Image segmentation techniques were carried out to find breast lesions within the mammograms in the region of interest (ROI), which is related to the area where breast density is concentrated. Breast density is defined as the brightest part on the mammographic image and it is composed by glandular and adipose tissue where breast lesions are likely to be exposed. This study provides a methodology divided in two main segmentation techniques: 1) a region growing technique and 2) split and merge technique. This study also gives a complete description of image analysis and the tools used in it.

Keywords: Breast cancer; mammograms; breast lesions; image analysis; region-based segmentation.

I. INTRODUCCIÓN

Se estima que el cáncer de seno es una de las causas más comunes de muerte en la población femenina a nivel mundial, y una de las formas de cáncer más prevalente entre otros tipos de cáncer. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, para el año 2012, se presentaron alrededor de 1.38 millones de nuevos casos de cáncer y de estos casos, cerca de 458,000 son muertes causadas por cáncer de seno cada año (1). Un diagnóstico temprano y oportuno es un factor determinante para un tratamiento adecuado de esta enfermedad, incrementando la probabilidad de supervivencia de quienes lo padecen (2). Para este propósito, se han diseñado métodos de evaluación de riesgo de cáncer de mama, con el fin de generar conciencia sobre el impacto del cáncer en la comunidad femenina y además como una metodología de diagnóstico indirecto.

Sin embargo, debido a la falta de conocimiento en la correcta aplicación de estas herramientas por parte de las mujeres, el examen de mamografía se ha convertido en la mejor herramienta de diagnóstico para la enfermedad (3). No obstante, debido al alto número de mamografías generadas cada año, como resultado de múltiples campañas de prevención y a la alta frecuencia de evaluaciones llevadas a cabo por los radiólogos, la tasa de precisión y la uniformidad del diagnóstico tienden a decrecer (2).

Además, debido a la naturaleza radiológica de la mamografía, se derivan durante la lectura por parte de los especialistas, algunos falsos positivos y/o nega-

tivos en el diagnóstico, que conllevan a disminuir la tasa de detección temprana de este cáncer (4).

Como solución a esta problemática, se propone el análisis de imágenes de mamografía digital como una herramienta necesaria de soporte a los radiólogos para detectar pequeñas anomalías en el tejido mamario, las cuales pueden estar relacionadas con masas inusuales como las microcalcificaciones (5). Para este propósito, se implementan técnicas de segmentación de imágenes y algunas operaciones morfológicas, con el fin de identificar la ubicación de posibles lesiones y mejorar la identificación visual de anomalías en las mamografías. Estas técnicas son algoritmos basados en regiones, como la segmentación por crecimiento de las mismas y la segmentación por división y fusión de regiones. Estos métodos son implementados en dos etapas: 1- la primera realiza el preprocesamiento de la imagen y la segmenta en regiones diferentes, tales como el borde del seno, el músculo pectoral y la zona del aire; como resultado se selecciona una región de interés (ROI) que está relacionada con el área donde la densidad mamaria se concentra en la imagen. La densidad mamaria se define como la parte más brillante en la imagen mamográfica y está compuesta por tejido fibroglandular y adiposo, y es allí donde es más probable hallar las lesiones mamarias (6). 2- La segunda etapa del algoritmo permite determinar áreas donde pueden encontrarse las lesiones. Los resultados muestran la efectividad de las técnicas de segmentación implementadas para el reconocimiento de patrones, en un diagnóstico asistido por computadora.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En los últimos años, algunos investigadores de diversas disciplinas han buscado la manera de proporcionar apoyo automático para el diagnóstico del cáncer de mama y con esto se han desarrollado varios métodos automatizados y semiautomatizados que se centran en la detección de lesiones en las imágenes de mamografía digital (7), (8). Estas investigaciones incluyen la extracción de las lesiones desde el fondo del pecho por binarización, para ser caracterizadas con base en su forma (9); otros autores proponen un esquema automático para la detección de masas anormales a través de segmentación anatómica de la región de interés mamaria (ROI) (10); también se propone un sistema de apoyo para el diagnóstico del cáncer de seno que consiste en superponer imágenes de mamografía y sugerir una anotación textual de las características del diagnóstico (11).

III. PRUEBA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de las pruebas, se seleccionó un grupo de 40 exámenes mamográficos con el fin de evaluar el rendimiento global del algoritmo desarrollado. Cada examen mamográfico está compuesto por cuatro imágenes que fueron evaluadas individualmente, dos de ellas refieren una vista craneocaudal (CC) de cada seno, y las dos restantes refieren la vista oblicua mediolateral (OML) (12). Este conjunto de imágenes incluye diagnósticos normales y patológicos.

IV. MÉTODOS PROPUESTOS

La metodología implementada fue realizada en dos etapas: 1) selección de la ROI y 2) detección de posibles lesiones. La primera de estas etapas permitió resaltar la región mamaria; para ello fue necesario realizar un filtrado que permitió homogeneizar la zona relacionada con el aire en la imagen, implementando operaciones morfológicas; además se realizó la segmentación del músculo pectoral utilizando técnicas de segmentación por regiones y finalmente se segmentó el borde del seno; estos tres procedimientos permitieron la identificación de la ROI, que contiene la densidad mamaria. En la segunda etapa, se detectaron posibles lesiones mediante la aplicación de la técnica de división y fusión. La metodología implementada se muestra en la Figura. 1.

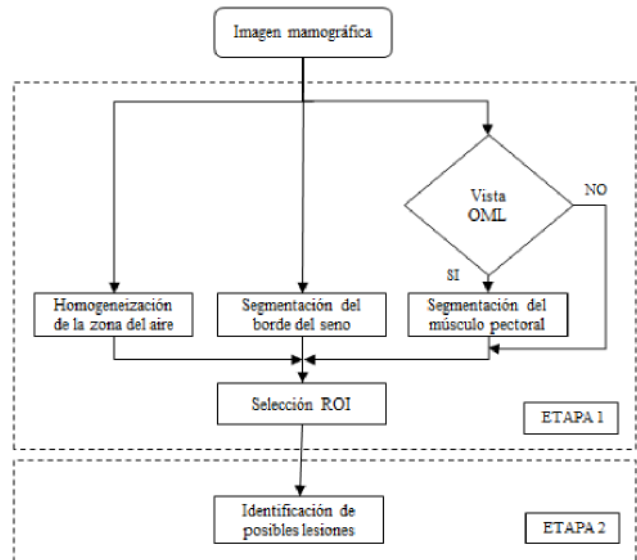


Figura. 1. Algoritmo de detección de posibles lesiones. Incluye preprocesamiento y procesamiento de las mamografías.

A. Selección de la ROI

Para seleccionar la ROI apropiada en cada imagen, fue necesario extraer de cada imagen todas las áreas presentes con niveles de intensidad más altos que el área de la densidad mamaria. Para lograrlo, se realizó un primer procedimiento que permitió identificar la orientación de la imagen.

1) *Orientación de la imagen:* La identificación de la orientación de la imagen (izquierda o derecha) se realizó mediante la comparación de la primera y la última columna de la matriz de la imagen, teniendo en cuenta sus valores de intensidad. La posición de la columna con el valor más alto de intensidad corresponde a la orientación y por lo tanto a la posición de la imagen mamaria.

2) *Homogeneización de la zona del aire:* Para la homogeneización del aire se utilizaron operaciones morfológicas para obtener una zona completamente homogénea dentro de la imagen, dicha zona es aquella en la cual no se encuentra ningún tejido en la imagen.

La dilatación y la erosión son definidas matemáticamente como operaciones entre conjuntos. Dada una imagen R definida como una matriz $n \times m$ en el espacio Z^2 ; y A, B como miembros del conjunto de un mismo espacio, la dilatación de A por B , denotado por $A \oplus B$, es el conjunto de todos los desplazamientos z , de tal manera que la reflexión del conjunto B (denotada por $\widetilde{B}$) coincide por al menos un elemento

(ec. 1). La erosión de A por B , denotado $A \ominus B$, es el conjunto de todos los puntos z de tal manera que B , traducido por z , está contenido y se define como se muestra en (ec. 2). Se define B como una forma llamada elemento estructurante, que controla objetos gruesos o delgados. La dilatación es una operación que permite ampliar objetos en una imagen binaria; en cambio, la erosión es una operación que encoge o adelgaza objetos en una imagen binaria (13), (14), (15).

$$A \ominus B = \{z | [(B)_z \subseteq A] \} \quad (\text{ec. 1})$$

$$A \oplus B = \{z | (B)_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (\text{ec. 2})$$

También se implementó otra operación morfológica llamada llenado de huecos. Esta es una reconstrucción morfológica basada en la formulación de que un hueco o agujero es un conjunto de píxeles del fondo de la imagen al que no se puede llegar llenando el fondo desde el borde de la imagen; es decir, un agujero es un área de píxeles oscuros rodeados de píxeles más claros (16).

3) *Segmentación del músculo pectoral*: el alto contraste, gran tamaño y brillo del músculo pectoral pueden resultar en un falso positivo al momento de detectar las posibles lesiones; con el fin de extraer este músculo de la imagen OML se realizó una técnica de segmentación basada en regiones, la cual es una técnica que permite dividir una imagen en diferentes zonas (13), (17). Dada una imagen R , la segmentación puede ser vista como una partición de R en n subregiones, tal que:

- La conexión de todas las subregiones es la región completa: $\bigcup_{i=1}^n R_i = R$
- R_i es una región conectada $i=1,2,\dots,n$.
- $R_i \cap R_j = \emptyset$ para todo $i \neq j$.
- $P(R_i) = \text{VERDADERO}$ para $i=1,2,\dots,n$.
- $P(R_i, R_j) = \text{FALSO}$ para $i \neq j$.

Donde, $P(R_k)$ es un predicado lógico definido sobre los puntos en el conjunto R_k y $\emptyset$ es el conjunto vacío.

La segmentación por crecimiento de regiones se basa en el agrupamiento de píxeles o subregiones, a partir de una "semilla" que podría ser un punto o un conjun-

to de puntos con ciertos criterios predefinidos. A partir de esta semilla, las regiones pueden crecer mediante la unión de los píxeles vecinos con características similares a la semilla (tales como nivel de gris, textura, color y forma) (18). El criterio seleccionado para esta técnica de segmentación fue el nivel de gris de la semilla, porque los píxeles del músculo pectoral son muy similares entre ellos. La intensidad de cada pixel cercano a la región es fácilmente comparada con el valor promedio de la intensidad de la región completa.

El principal reto de esta etapa de la investigación fue determinar el lugar adecuado para seleccionar la semilla inicial y elegir los criterios para evaluar los posibles píxeles que serían incluidos en la región. El lugar para ubicar la semilla: derecha o izquierda, fue elegido dependiendo del tipo de vista de la mamografía. Por otra parte, como es particular en las imágenes de mamografía, los píxeles del músculo pectoral pueden tener valores de alta intensidad, por lo que se seleccionó un umbral basado en el valor de la intensidad del píxel donde se plantó la semilla inicial. Finalmente, se obtuvo una máscara de músculo pectoral, con la cual fue posible segmentar esta región.

4) *Segmentación del borde del seno*: el borde del seno es ligeramente brillante en comparación con el resto del tejido mamario y podría ser procesado por el algoritmo como posibles lesiones. Es necesario entonces segmentar este borde a través de una técnica llamada Extracción de bordes.

El borde de un conjunto A , denotado por $\beta(A)$, puede obtenerse por la erosión de A por B y realizar la diferencia de conjuntos entre A y su erosión como se muestra en (ec. 3), donde B es el elemento estructurante (13).

$$\beta(A) = A - (A \ominus B) \quad (\text{ec. 3})$$

B. Detección de posibles lesiones

La segunda etapa del método fue desarrollada con el fin de detectar posibles lesiones en imágenes de mamografía; y para esto se llevó a cabo una técnica de segmentación basada en regiones, conocida como División y Fusión (Fig. 1).

Dada R , la región de toda la imagen y P , los criterios de semejanza, se define el método para segmentar cualquier región R_i como la división en cuatro cuadrantes disjuntos si se cumple que $P(R_i) = \text{Falso}$. Cuando no

existe más división es posible unir regiones adyacentes R_j y R_k para el cual $P(R_j \cup R_k) = \text{Verdadero}$, y se detendrá cuando la fusión ya no sea posible (13), (19). A través de este procedimiento, se detectaron posibles lesiones en las mamografías como se muestra en los resultados.

V. RESULTADOS

Los resultados para cada etapa del algoritmo diseñado se muestran en las Figura. 2, Figura. 3 y Figura. 4. La ROI seleccionada se delimitó exitosamente. La zona del aire fue definida y se removieron las marcas de identificación de la imagen. Además se removió completamente el borde del seno y finalmente se segmentó el músculo pectoral (ver Figura. 2-A y 2-B). A diferencia de la imagen OML, en las imágenes CC, el músculo pectoral no fue removido; por lo tanto solamente se llevó a cabo la homogeneización del aire y la remoción de las marcas de identificación (ver Figura. 2-C y 2-D).

La segmentación del músculo pectoral es importante debido a su alto brillo en comparación con el resto del tejido mamario, además, la segmentación de este permite aislar la región de interés que se limita a la densidad de la mama y por lo tanto, puede evitar posibles falsos diagnósticos.

La detección de posibles lesiones en la ROI se logró mediante la técnica de segmentación de división y fusión de regiones. Los parámetros estadísticos con los que fue construido el algoritmo fueron la media y la desviación estándar. La identificación de las posibles áreas de lesiones se realizó con una precisión apropiada. Esta metodología tuvo una efectividad satisfactoria; las regiones de las posibles lesiones fueron identificadas y resaltadas con líneas rojas como se muestra en las Figura. 3 y Figura. 4.

El algoritmo propuesto en este trabajo presentó los resultados esperados en gran parte de las imágenes evaluadas. De acuerdo a los resultados, aquellas áreas con posibles lesiones fueron detectadas satisfactoriamente. Sin embargo, todos los resultados deben ser analizados y evaluados por un especialista, análisis que se realizó en una etapa posterior a este proyecto, con el fin de validar clínicamente los resultados de los algoritmos implementados.

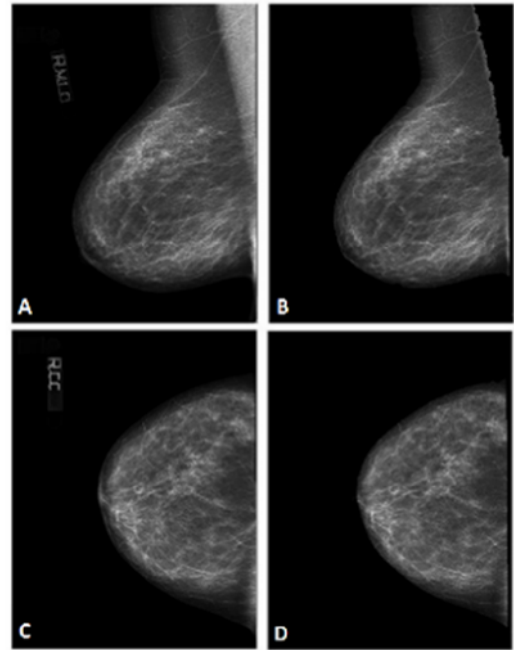


Figura. 2. Mamografías originales (A,C) y la ROI seleccionada (B,D), de la vista oblicua mediolateral (A,B) y de la vista craneocaudal (C,D).

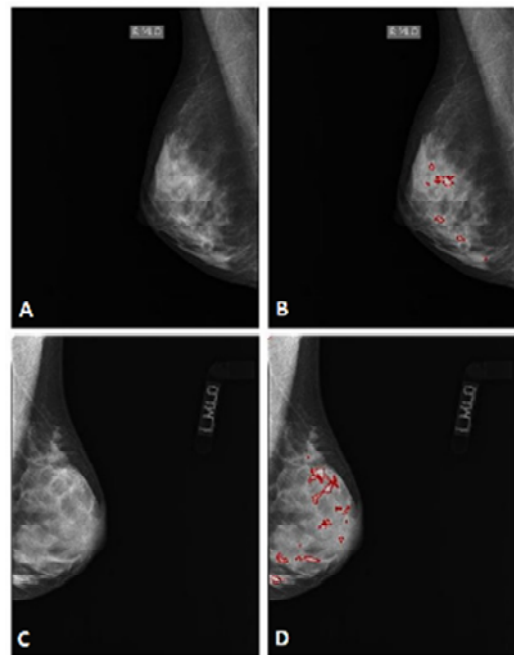


Figura. 3. Vista mamográfica oblicua mediolateral después de ser procesada. Imagen original (A,C). Imagen procesada (B,D), posibles lesiones resaltadas con líneas rojas.

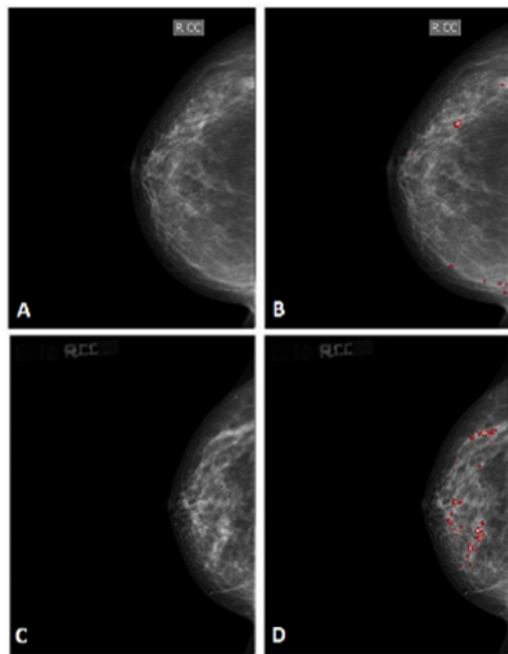


Figura. 4. Vista mamográfica craneocaudal después de ser procesada. Imagen original (A,C). Imagen procesada (B,D), posibles lesiones resaltadas con líneas rojas.

VI. TEST DE VALIDACIÓN

Con el fin de verificar la eficiencia de la metodología propuesta, se llevó a cabo un procedimiento de validación en el cual se realizó la comparación del número de píxeles con alta intensidad en la imagen de

mamografía, antes y después del procesamiento de la imagen.

Debido a que las lesiones mamarias presentan una alta intensidad respecto al resto del seno, se seleccionó un umbral correspondiente al 70% de la distribución del histograma. Para la etapa 1, se realizó una evaluación preliminar del número de píxeles de la imagen procesada con base en el umbral, es decir, se obtuvo el número de píxeles cuya intensidad fue mayor que el valor del umbral, obteniendo así la región más brillante de la muestra. Luego, en la etapa 2, nuevamente se calculó la cantidad de píxeles con las mayores intensidades; debido a que el propósito es determinar las posibles lesiones mamarias, se esperaba conservar la cantidad de píxeles de alta intensidad antes y después de la aplicación del algoritmo, confirmando los resultados preliminares obtenidos en la etapa 1. Sin embargo, debido a las diferencias entre los resultados en ambas etapas y a la cantidad de regiones que falsifican la detección, el número de píxeles de alta intensidad varía de una etapa a otra, haciéndose necesario calcular la eficiencia de cada una de las etapas.

La clasificación de los resultados de la validación se muestra en la tabla 1. La clase 1 representa alta eficiencia ($> 85\%$); la clase 2 corresponde a aquellas imágenes para las cuales se obtuvo una eficiencia entre 70% y 85%, y finalmente, la clase 3 representa una eficiencia menor a 70%.

TABLA 1. TEST DE VALIDACIÓN. NÚMERO DE IMÁGENES POR CADA CLASE DE ACUERDO A LA EFICIENCIA DEL ALGORITMO DE SEGMENTACIÓN PARA LA ETAPA 1 Y ETAPA 2.

Tipo de Imagen	ETAPA 1			ETAPA 2		
	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 1	Clase 2	Clase 3
CCD	40	0	0	29	4	7
CCI	40	0	0	27	6	7
OMLD	28	4	8	27	8	5
OMLI	29	2	9	31	5	4

* CCD, OMLD: derecha. CCI, OMLI: Izquierda

VII. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos al aplicar en conjunto todo el algoritmo desarrollado, en varias mamografías digitales de diferentes pacientes, demostraron la efectividad de las técnicas propuestas. Las zonas donde posiblemente se encuentra una lesión mamaria, fueron identificadas satisfactoriamente en la mayoría de las mamografías evaluadas.

El algoritmo propuesto promete ser una herramienta de soporte diagnóstico a los radiólogos y de esta manera aumentar los casos de detección temprana de cáncer de seno. El análisis de mamografía digital, en conjunto con el procesamiento digital de imágenes, demostraron ser un método efectivo para la prevención del cáncer de seno.

Los resultados derivados de este proyecto fueron eva-

luados y comparados por un equipo de especialistas en análisis de mamografía, en una fase posterior a este. Este proyecto hace parte de un macroproyecto titulado “Identificación de Lesiones en Mamografía Digital”.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por la Universidad de Antioquia, proyecto CODI SOS11-2-01 Estrategia de Sostenibilidad 2011-2012. Las imágenes fueron facilitadas por el centro de diagnóstico CEDIMED.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ferlay J, Soerjomataram, I. Ervik M, Dikshit R, Eser S, Mathers C, Robelo M, et al. GLOBOCAN 2012 v1.0, Cancer Incidence and Mortality Worldwide: IARC CancerBase No. 11 [Internet]. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer; 2013. Available from: <http://globocan.iarc.fr>
2. Fernández McCann DS. Ayuda al Diagnóstico Médico de la Mamografía Mediante Técnicas de Procesamiento Digital de Imágenes. *Rev Fac Ing Univ Antioquia*. 2001;(22):116–25.
3. Bandyopadhyay SK. Pre-processing of Mammogram Images. *Int J Eng Sci Technol*. 2010;2(11):6753–8.
4. Hadjiiski L, Sahiner B, Chan H-P, Helvie MA. Automated Registration and Classification Techniques for Interval Change Analysis in Mammography. *Fuzzy Inf Process Soc 2005 NAFIPS 2005 Annu Meet North Am*. 2005;55–60.
5. Freitas da Cruz C. Automatic analysis of Mammography Images. Universidade do Porto; 2011.
6. Yaffe MJ. Mammographic density. Measurement of mammographic density. *Breast Cancer Res* [Internet]. 2008 Jan [cited 2014 Nov 1];10(3):209. Available from: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2481498&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
7. Sampat MP, Bovik AC. Detection of spiculated lesions in mammograms. *Engineering in Medicine and Biology Society*, 2003. Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE. 2003. p. 810–813 Vol.1.
8. Guerra A, Rivas J. Detección de microcalcificaciones en imágenes mamográficas usando redes neuronales. *Rev la Fac Ing Univ Cent Venez. scielo_ven*; 2011;26:7–14.
9. Szekely N, Pataki B. Detecting lesions in a mammogram. *Video/Image Processing and Multimedia Communications*, 2003. 4th EURASIP Conference focused on. 2003. p. 113–118 vol.1.
10. Maitra IK, Nag S, Bandyopadhyay SK. Automated Digital Mammogram Segmentation for Detection of Abnormal Masses Using Binary Homogeneity Enhancement. *Indian J Comput Sci Eng*. 2011;2(3):416–27.
11. Narváez Espinoza FR. Sistema de Anotación para Apoyo en el Seguimiento y Diagnóstico de Cáncer de Seno. Universidad Nacional de Colombia; 2010. p. 85.
12. Yam M, Brady M, Highnam R, Behrenbruch C, English R, Kita Y. Three-dimensional reconstruction of microcalcification clusters from two mammographic views. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*. 2001. p. 479–89.
13. Gonzalez RC, Woods RE, Eddins SL. *Digital Image Processing Using MATLAB*. 2nd ed. New Jersey: Gatesmark Publishing; 2009.
14. Gonzalez RC, Woods RE. *Digital Image Processing*. Pearson/entice Hall; 2008.
15. Yu Z, Zhao Y, Wang X. Research advances and prospects of mathematical morphology in image processing. *Cybernetics and Intelligent Systems*, 2008 IEEE Conference on. 2008. p. 1242–7.
16. Mathworks, Inc., *MATLAB® Image Processing Toolbox*, The MathWorks, Inc, USA. 2010.
17. Yim PJ, Choyke PL, Summers RM. Gray-scale skeletonization of small vessels in magnetic resonance angiography. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*. 2000. p. 568–76.
18. Almi'ani MM, Barkana BD. Automatic segmentation algorithm for brain MRA images. *Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, 2012 IEEE Long Island. 2012. p. 1–5.
19. Karmakar GC, Dooley LS, Murshed M. Image segmentation using modified extended fuzzy rules. *Signal Processing*, 2002 6th International Conference on. 2002. p. 941–944 vol.2.

DETECCIÓN DE POSES DE LAS MANOS USANDO DESCRIPTORES LBP

DETECTION OF HAND LBP DESCRIPTORS

Cristhian Torres Arboleda¹, Marcela Iregui Guerrero².

¹ Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. E-mail: cristhian.ta93@gmail.com

² Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: marcelairegui@gmail.com

Recibido: 07 de Octubre de 2014

Aceptado: 18 de Noviembre de 2014

*Correspondencia del autor: E-mail: cristhian.ta93@gmail.com

RESUMEN

El reconocimiento de gestos se ha presentado como una alternativa para la implementación de sistemas de interacción eficaces. Particularmente las aplicaciones basadas en visión artificial poseen ventajas en portabilidad frente a otras alternativas. Sin embargo, los algoritmos suelen requerir entrenamiento computacional intensivo, siendo difíciles de implementar en dispositivos móviles. En este artículo se realiza un estudio preliminar para la detección de poses de la mano usando un algoritmo basado en Patrones Binarios locales, más conocido por su sigla en inglés LBP (Local Binary Patterns). Para lo anterior, se presenta un modelo heurístico de división de la mano en regiones ponderadas diferencialmente, que permite la clasificación directa de los gestos usando una medida de similitud. Los pesos y la distribución de regiones se evaluaron de acuerdo a su precisión en la clasificación de cada pose de la mano. Estas pruebas se realizaron en un conjunto de imágenes, capturadas en condiciones controladas, correspondientes a cinco poses diferentes. El algoritmo propuesto con el esquema de regiones ponderadas muestra una buena capacidad de discriminación y presenta una alternativa válida para futuras aplicaciones.

Palabras Clave: Local binary Pattern (LBP), interacción humano computador (HCI), reconocimiento de gestos de las manos, pose, visión por computador.

ABSTRACT

Gesture recognition has been presented as an alternative for the implementation of efficient interaction. Particularly machine vision-based applications have advantages in portability over other alternatives. However, algorithms often require computational intensive training, being difficult to implement in mobile devices. This paper presents a preliminary study to detect poses hand using an algorithm based on local binary patterns, better known by its acronym LBP (Local Binary Patterns). Thus, a heuristic model of hand division in regions differentially weighted, which allows direct classification of gestures using a similarity measure, is presented. Weights and distribution regions were evaluated according to their accuracy in the classification of each hand pose. Those tests were performed on a set of images captured in controlled conditions corresponding to five different poses. The proposed algorithm with the scheme of weighted regions shows a good ability to discriminate and presents a viable alternative for future applications.

Keywords: Local Binary Pattern (LBP), human computer interaction (HCI), recognition of hand gestures, pose, computer vision.

I. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca dentro de la problemática existente en términos de interacción con dispositivos electrónicos, ya que, si bien es cierto que el teclado y el ratón son ampliamente usados, no representan una buena opción en términos de usabilidad para aplicaciones multimedia, personas en condición de discapacidad o en equipos móviles. Estos últimos, por ejemplo, a pesar de que cada vez son más potentes, es claro que las limitaciones en el tamaño dificultan la interacción.

La preocupación por mejorar la experiencia del usuario, mediante la oferta de sistemas de interacción natural, ha impulsado la creación de dispositivos y la implementación de algoritmos eficientes para lograr la detección precisa de instrucciones del usuario. Entre las múltiples posibilidades para la interacción por medio de gestos, se han propuesto técnicas basadas en diversos dispositivos como guantes, instrumentos hápticos, marcadores ópticos, controladores con sensores y sensores de movimiento como Kinect entre otros. Si bien muchos de los dispositivos son bastante precisos y conducen a desarrollos rápidos de una amplia variedad de aplicaciones, presentan desventajas relacionadas con los altos costos, la portabilidad y configurabilidad (1), (2).

El reconocimiento de gestos por medio de técnicas de visión por computador presenta una oportunidad para mejorar la interacción en portabilidad y ubicuidad, se han utilizado técnicas basadas en imágenes RGB o RGB-Depth. Estos han sido previamente explorados por medio de diversas técnicas, algunas más efectivas que otras. Trigueiros y otros, (3), evalúan siete algoritmos de reconocimiento de gestos estáticos, basados en imágenes obtenidas con una cámara Kinect. Sin embargo, los resultados presentados no son concluyentes, principalmente por la baja resolución y ruido

en las imágenes obtenidas. Por otro lado el amplio uso y acceso a las cámaras web convencionales, que hoy por hoy cuentan con excelente resolución y se encuentran en la mayoría de los dispositivos, presentan una oportunidad más económica y simple para sistemas de interacción basados en visión por computador. En (2), los autores presentan una comparación de diversos métodos de detección de gestos basados en análisis de apariencia o modelos de la mano y en técnicas de análisis de imágenes combinada con aprendizaje de máquina. Sin embargo, el problema de complejidad computacional es un problema importante que tiene la mayoría de este tipo de algoritmos (3), (4). Por esto la importancia de desarrollar técnicas robustas pero a la vez ligeras, que puedan ser implementadas en dispositivos móviles.

El algoritmo LBP (Local Binary Patterns) ha demostrado ser una excelente alternativa para la caracterización de imágenes por medio del análisis de texturas y para el reconocimiento de patrones, gracias a su rendimiento y eficacia. Por ejemplo, en (5) se plantea un método de reconocimiento de rostros basado en patrones locales binarios, calculados en regiones independientes, las cuales son definidas y pesadas heurísticamente para el proceso de clasificación, por medio de la medida de similitud Chi Cuadrado. Los resultados con el uso de LBP representan avances importantes para la detección de rostros.

El uso de LBP como descriptor para reconocimiento de gestos de las manos ha sido utilizado previamente, combinado con algoritmos de aprendizaje de máquina robustos como AdaBoost en (6), (7) y SVM en (4). Sin embargo, si bien las tasas de precisión son buenas, los algoritmos de aprendizaje aumentan la complejidad computacional en el reconocimiento.

En este trabajo se realiza un estudio del algoritmo LBP para reconocimiento de gestos de las manos,

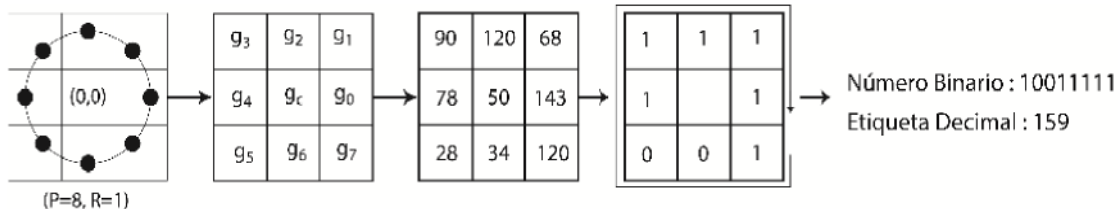


Figura. 1. Operador LBP. A la izquierda, la distribución de la vecindad de 8 píxeles con radio 1. En la parte derecha un ejemplo del cálculo del descriptor para el píxel g_c , en cuyo caso se calculan las diferencias con píxeles vecinos y de acuerdo a la configuración de los cambios, se construye el patrón binario correspondiente.

empleando la caracterización por regiones, de forma análoga a como se propone en (5) para reconocimien-

to de rostros. Lo anterior usando como único clasificador una medida de similitud basada en ChiCuadrado.

II. PATRONES BINARIOS LOCALES – LBP

El operador LBP actúa sobre la imagen en escala de grises, a cada pixel se le asigna una etiqueta, de acuerdo con la configuración de la vecindad circular de radio R ver figura 1. Si P es el número total de píxeles vecinos utilizados, g_c es el valor en escala de grises del pixel central y g_p corresponde al valor en escala de grises de un pixel vecino, la etiqueta LBP se calcula según la siguiente ecuación:

$$LBP_{P,R} = \int_{p=0}^{P-1} 2^p s(g_p - g_c) \quad (1)$$

donde $s(x)$ es la función signo, definida como:

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Una vez recorridos los píxeles de la imagen o de una región en particular, se calcula el descriptor de textura por medio de la creación de un histograma con 2^P muestras correspondientes a los posibles valores de etiquetas LBP. Dos histogramas de diferentes imágenes pueden ser comparados por medio de una medida de distancia.

III. MÉTODO

El método propuesto en este trabajo se basa en el uso de los descriptores LBP y la medida de similitud Chi-Cuadrado, en regiones independientes de la mano. De forma análoga al trabajo presentado en (5), en este artículo se parte de la hipótesis de que, al igual que en las imágenes de rostros, existen zonas características de la mano que aportan información diferencial relacionada con el gesto. Por lo anterior, el método propuesto considera la división de la imagen y la asignación de pesos específicos de acuerdo a una heurística guiada por la concentración de información relacionada con el gesto. Por cada una de las m regiones se calcula un histograma LBP de longitud $n=2^p$, con

lo cual, el número de histogramas calculados es equivalente al número de regiones. Estos se concatenan en un único vector de longitud $m*n$, que representa una descripción global de la imagen.

Teniendo en cuenta la eficiencia que se espera de los algoritmos, no se emplean clasificadores sofisticados. La identificación de los gestos se realiza usando una medida ponderada de similitud chi-cuadrado, de acuerdo con un peso asignado a cada región. Partiendo del principio de que las regiones de la imagen contienen mayor cantidad de información relacionada con el gesto se asigna un peso diferencial a cada región j, w_j , de tal forma que la comparación entre dos histogramas, $H; I$, se realiza con la función chi-cuadrado ponderada:

$$X_w(H, I) = \sum_{ij} W_j \frac{(H_{ij} - I_{ij})^2}{H_{ij} + I_{ij}} \quad (3)$$

Para determinar la efectividad del clasificador, como primera medida, se analiza el efecto que tiene la comparación independiente de los histogramas de textura, en subdivisiones de la imagen y de acuerdo al tamaño de las mismas. Como segunda medida, por medio de una búsqueda iterativa, se determina la relación óptima de pesos por regiones, con el propósito de identificar la importancia de cada región en la caracterización del gesto.

A. Configuración de las regiones

Con el fin de identificar la capacidad de discriminación del descriptor LBP, en relación con el tamaño de las regiones comparadas, las imágenes se subdividen en partes cada vez más pequeñas y se evalúa el rendimiento de la clasificación. Con el fin de evitar problemas de escala, las imágenes se ajustan al área de delimitación de la mano. (Ver figura 2). En este caso a cada región se le da el mismo peso en la ponderación del chi-cuadrado.

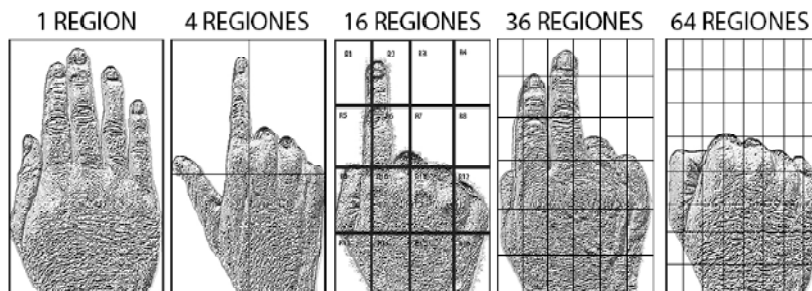


Figura. 2. Configuración de las regiones de acuerdo al tamaño para la comparación del histograma de textura LBP.

B. Configuración de los pesos

Una vez analizado el efecto de las subdivisiones, se identifican varias configuraciones de pesos sobre diferentes zonas de la imagen, para evidenciar la importancia de cada una en la identificación del gesto.

Lo anterior por medio de un método heurístico, basado en un protocolo jerárquico que busca establecer las posibles distribuciones de regiones y pesos en diversos niveles de detalle. La figura 3 muestra gráficamente el protocolo, el cual se puede analizar de acuerdo a diversos niveles:

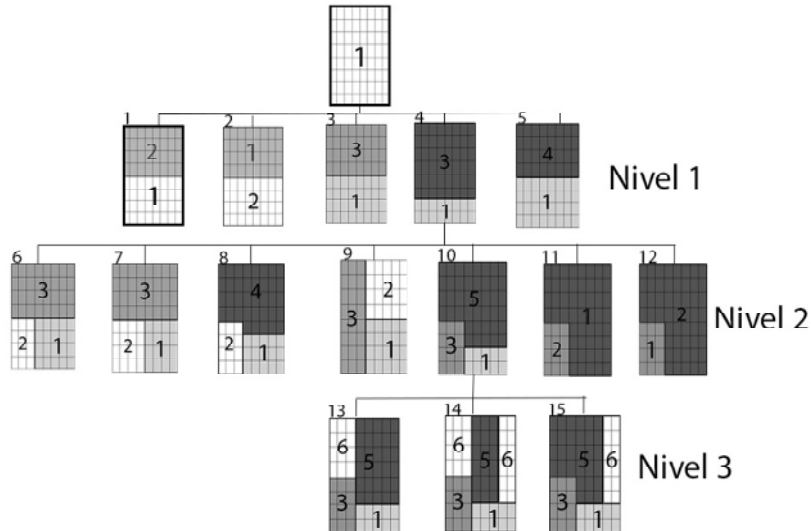


Figura. 3. Niveles de distribución de zonas de la imagen y posibles distribuciones de pesos.

- En el primer nivel los pesos se distribuyen en dos regiones. Para este primer caso se separan los dedos (parte superior) y el dorso (parte inferior) y además se busca establecer, que tanto influye la región de los nudillos.
- En el siguiente nivel los pesos se distribuyen en tres regiones, se parte de la configuración con mejores resultados en el nivel anterior y se redistribuyen los pesos con el fin de evidenciar la mejor relación de pesos entre el pulgar, los otros dedos de la mano y el dorso.
- Partiendo de la mejor distribución en el nivel anterior, se subdivide la parte superior de la mano donde se encuentran los dedos para ver en qué

grado afecta esto al conjunto del reconocimiento.

IV. PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de las pruebas, se creó una base de datos de 23 imágenes de 5 poses de la mano derecha, para un total de 115 imágenes, puno, palma, índice, pulgar-índice e índice-medio en un ambiente uniforme y controlado, permitiendo la extracción de la mano respecto al fondo y delimitando la imagen a los bordes de la misma. Como paso siguiente, se convierte cada imagen de RGB a escala de grises (ver Fig.4), para ser utilizadas en el análisis del LPB. Todas las imágenes tienen igual tamaño, 400 px de alto y 240 px de ancho.



Figura. 4. Las cinco poses que conforman las clases del clasificador

Para la evaluación se realiza una validación cruzada tipo LOOCV, en la cual se deja una muestra para validación y las restantes como conjunto de entrenamiento. El proceso se realiza para veintitrés (23) iteraciones por cada clase, con cada una de las imágenes de prueba. A partir del conjunto de entrenamiento de cada clase se calcula el histograma LBR_{PR} promedio usando como parámetros, una vecindad circular de radio $R = 1$ y un número de ocho píxeles vecinos, $P = 8$.

Para cada imagen de prueba se calcula el descriptor LBP_{PR} , el cual se compara con los histogramas promedio obtenidos en la fase de entrenamiento para cada clase, por medio del chi-cuadrado ponderado. El gesto correspondiente se clasifica en la clase con mayor similitud, es decir, menor valor de X (Ecuación 3). Lo anterior, se realiza con cada una de las cinco configuraciones presentadas en la sección anterior, para identificar la precisión obtenida en cada caso.

A partir de estos resultados se construye una matriz de confusión que permite identificar el número de Verdaderos Positivos (VP), Verdaderos Negativos (VN), Falsos Positivos (FP), Falsos Negativos (FN), y a partir de estos valores se realizan los cálculos de precisión (PPV), sensibilidad (TPR) y de la medida F (F_1), para cada una de las M clases. Es decir que el cálculo de cada una de estas métricas para una clase i , está dada por las siguientes ecuaciones.

$$PPV_i = \frac{VP}{VP + FP} \quad (4)$$

$$TPR_i = \frac{VP}{VP + FN} \quad (5)$$

$$F_{1,i} = 2 \frac{PPV_i \cdot TPR_i}{PPV_i + TPR_i} \quad (6)$$

Para la evaluación general de la clasificación, los resultados se reportan según las medidas macro, es decir se promedian cada una de estas tres métricas para el conjunto de todas las clases posibles.

$$PPV = \frac{\sum_{i=1}^M PPV_i}{M} \quad (7)$$

$$TPR = \frac{\sum_{i=1}^M TPR_i}{M} \quad (8)$$

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^M F_{1,i}}{M} \quad (9)$$

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los histogramas promedio de entrenamiento se obtuvieron con veintidós (22) de las veintitrés (23) imágenes de la base de datos en cada pose, la imagen restante es comparada con estos para ser clasificada en una de las cinco poses, por medio del chi-cuadrado ponderado. De acuerdo con los resultados obtenidos en cada clasificación, se evaluó, para cada distribución en regiones, su precisión, sensibilidad y la medida conocida como medida-F o F-score, para evaluar con un valor único el resultado de las pruebas.

Los resultados de la variación de la precisión y sensibilidad de acuerdo al tamaño de las regiones se muestran en la tabla I. Las cifras muestran que la comparación de los histogramas requiere cierto grado de granularidad, pero que a partir de cierto nivel se comienza a perder precisión. Como se observa se obtiene un valor óptimo de precisión y de F-score al dividir en 64 regiones.

TABLA I. COMPARACIÓN DE LA EFICACIA DEL MÉTODO PARA DIFERENTES SEGMENTACIONES

Regiones	Distribución WxH	Precisión (PPV)	Sensibilidad (TPR)	Medida-F (F1)
1 región	1x1	71,40%	69,60%	69,10%
4 regiones	2x2	86,10%	85,22%	85,57%
16 regiones	4x4	87,00%	86,20%	85,80%
36 regiones	6x6	89,50%	88,70%	88,71%
64 regiones	8x8	94,11%	93,91%	93,96%
121 regiones	11x11	93,95%	93,91%	93,91%
256 regiones	16x16	93,95%	93,91%	93,91%
484 regiones	22x22	93,19%	93,04%	93,06%

A continuación se analizan los resultados obtenidos luego de evaluar las diversas configuraciones de pesos. Para esto se parte de una distribución de 64 regiones, por ser esta la que mejores resultados ofrece. Se discute para cada nivel el resultado encontrado de acuerdo con el árbol de la Figura 5.

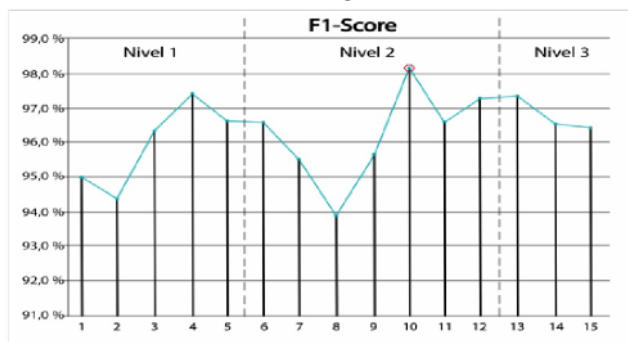


Figura 5. Medición del F1-score para cada una de las opciones evaluadas, según el árbol de la Figura 3

- Nivel 1: El análisis de los resultados presentados en el primer nivel del árbol de la figura 3, demuestran la hipótesis de que los dedos son más discriminantes que el dorso de la mano, en lo que a gestos se refiere. Además, el resultado de la configuración número cuatro permite establecer que los nudillos también contribuyen a la correcta clasificación. Por otro lado se observa que la relación de pesos óptima entre el dorso y los dedos, para este caso es de 1:3 respectivamente.
- Nivel 2: Partiendo de los resultados encontrados en el nivel anterior y subdividiendo las imágenes en tres regiones, para identificar independientemente las partes correspondientes al dorso, el pulgar y los cuatro dedos restantes (nudillos incluidos); se encuentran resultados óptimos en la relación 1:3:5 respectivamente (configuración número 10). Evidenciando que las zonas más relevantes corresponden a los dedos de las manos, siendo el pulgar menos discriminante que los otros.
- Nivel 3: De acuerdo con los resultados del nivel 3 se encuentra que realizar mayor cantidad de divisiones para discriminar los dedos de las manos, no representa mayor beneficio en la distribución de los pesos.

Por lo anterior se obtiene una distribución de pesos óptima (configuración 10 de la Figura 3) que permite alcanzar métricas de hasta 98, 4% en precisión, 98, 26% en sensibilidad y 98, 28% en medida-F. Lo cual representa un resultado bastante alentador para el reconocimiento de poses.

VI. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se propuso un sistema novedoso para el análisis y reconocimiento de gestos de la mano, basado en la división por regiones de la imagen, lo cual permite analizar cambios de gran relevancia en zonas específicas de la mano. Cada región posee una descripción de la

aparición de una parte de una pose y la combinación de todo el conjunto de regiones dan una descripción global de ésta. Por otro lado, el algoritmo basado en Patrones Locales Binarios (LBP) es un eficiente caracterizador de la pose, robusto y eficaz y dada su baja complejidad computacional, es una excelente alternativa para su implementación en dispositivos móviles.

Finalmente se concluye que de forma similar al rostro, la mano tiene características en regiones que son más determinantes que otras, influyendo significativamente en el reconocimiento de la pose. Es así como en la separación de las zonas superiores y de los nudillos, con valores de peso diferenciales en cada caso, influye en el resultado de similitud existente entre estas mismas.

El número de imágenes de la base de datos, permite aprender mejor de las poses y por consiguiente a su clasificación. Un conjunto más amplio de imágenes de entrenamiento es necesario, permitiendo adquirir más resultados que certifiquen que el LBP es un buen caracterizador de textura y base para la clasificación e identificación de la pose.

Los resultados preliminares se obtuvieron a partir de un conjunto de imágenes de poses, adquiridas en condiciones controladas, para la mano derecha, sin rotación alguna, ni variaciones de iluminación; permitiendo que la división de las regiones de las manos sean similares unas con otras, proporcionando una comparación e identificación más exacta. Si en embargo, es necesario realizar pruebas del LBP para poses mayores factores de variación.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es producto derivado del Proyecto de Iniciación Científica PIC ING-1579, enmarcado dentro el Proyecto de Investigación INV ING-1534, financiados por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada - Vigencia 2014.

BIBLIOGRAFÍA

1. Meenakshi Panwar and Pawan Singh Mehra. "Hand Gesture Recognition for Human Computer Interaction". En: International Conference on Image Information Processing. Centre for Development of Advanced Computing Noida, Uttar Pradesh, India; (ICIIP 2011).
2. Ankit Chaudhary, J. L. Raheja, Karen Das and Sonia Raheja, "Intelligent Approaches to interact with Machines using Hand Gesture Recognition in Natural way: A Survey". International Journal of Computer Science and Engineering Survey (IJCSES) Vol.2, No.1, Feb 2011.
3. Paulo Trigueiros, Fernando Ribeiro and Luis Reis, "A Comparative Study of Different Image Features for Hand Gesture Machine Learning". International Conference on Agents and Artificial Intelligence. ICAART 2013.
4. Vladimir I. Pavlovic, Rajeev Sharma and Thomas S. Huang, "Visual Interpretation of Hand Gestures for Human-Computer Interaction: A Review". IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 19, no. 7.
5. Timo Ahonen, Abdenour Hadid and Matti Pietikäinen, "Face Description with Local Binary Patterns: Application to Face Recognition". Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 28, no. 12, 2006.
6. Youdong Ding, Haibo Pang, Xuechun Wu and Jianliang Lan, "Recognition of hand-gestures using improved local binary pattern". En: International Conference on Multimedia Technology (ICMT), 2011.
7. Bin Xiao, Xiang-min Xu and Qian-pei Mai, "Real-Time Hand Detection and Tracking Using LBP Features". School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology Guangdong. 2010.

CONTROL DE UN ROBOT HUMANOIDE UTILIZANDO MOTION RETARGETING

CONTROL OF A HUMANOID ROBOT USING MOTION RETARGETING

Juan Felipe Medina Lee¹, Luis Miguel Capacho Valbuena²

¹ Universidad del Quindío, Armenia, Quindío. E-mail: jfmedina@uniquindio.edu.co

² Universidad del Quindío, Armenia, Quindío. E-mail: lmcapacho@uniquindio.edu.co

Recibido: 3 Noviembre

Aceptado: 15 Diciembre

*Correspondencia del autor. Universidad del Quindío, Armenia, Quindío. E-mail: jfmedina@uniquindio.edu.co

RESUMEN

En este proyecto se hace el control de las extremidades superiores de una plataforma robótica humanoide utilizando la técnica de motion retargeting, que redirige los movimientos de un operador humano al androide. El sistema propuesto hace uso del microsoft kinect para reconocer las articulaciones del operador, posteriormente hace un cambio de coordenadas, verificación de los límites de los ángulos permitidos por la plataforma y finalmente se transmiten los movimientos al robot para que 'imite' los movimientos del operador, actualmente el sistema reproduce dos grados de libertad en cada hombro, uno en cada codo y uno en la cintura. Con este proyecto se pueden realizar rutinas de movimientos para la plataforma sin necesidad de marcas especiales y/o cables sobre el operario, y se evitan procedimientos invasivos

Palabras claves: Control, kinect, motion retargeting, plataforma robótica, robot humanoide.

ABSTRACT

This project implements the control of upper extremities in a humanoid robotic platform using a motion retargeting technique. The system uses a Microsoft Kinect to recognize the operator's joints; then it performs a coordinate's transformation, validates the limit angles of the robotic platform and finally it transmits the movements to humanoid platform. The robot has two degrees of freedom in the shoulder, one in the elbow and another one in the waist. Using this project, several movements' routines can be played by the humanoid robot without using any special marks or cables on the operator, avoiding invasive methods to do so.

Keywords: kinect, motion retargeting, robotic platform, control, humanoid robot.

Introducción

Un humanoide es un robot con forma de cuerpo humano. Actualmente existe un amplio estudio relacionado con esta área gracias al potencial para tareas diarias en el hogar, hospitales u oficina que pueden realizar (1).

El control de un robot humanoide esta enmarcado en la manipulación de ordenes preestablecidas, las cuales pueden ser enviadas por medio de interfaces físicas y eléctricas para la ejecución de un movimiento determinado. Para ello se ha usado interfaces de comunicación alámbrica e inalámbricas.

Este tipo de control dificulta la fluidez en el movimiento adecuado del humanoide (2). Un control mas preciso usado en la actualidad consiste en realizar la manipulación del humanoide usando como referencia los movimientos de las articulaciones de un ser humano. Para la obtención de los movimientos humanos como referencia, es posible realizarlo con el uso de sensores distribuidos a lo largo de las articulaciones de la referencia. Sin embargo, se ha optado por hacer uso de captura de movimiento usando procesamiento de imágenes para la obtención de puntos de interés.

En este trabajo se muestra el control de un robot humanoide usando el microsoft kinect que permite la captura de las articulaciones humanas para luego enviar los movimientos al robot humanoide que son imitados manipulando las mismas articulaciones en el robot y permitiendo una posición correspondiente del efector final con respecto a la referencia humana; este concepto es conocido como motion retargeting.

Componentes del sistema

Cámara y captura de datos

La captura de datos se hace utilizando la plataforma kinect de Microsoft, se eligió debido a su capacidad de capturar imágenes con profundidad y al soporte de software que tiene, ya que con el SDK proporcionado por Microsoft (3) se puede extraer fácilmente información de color, profundidad y ubicaciones de las articulaciones, especialmente las de la parte superior del cuerpo, en donde se pueden capturar 11 grados de libertad (GDL) (4) como se muestra en la Figura. 1

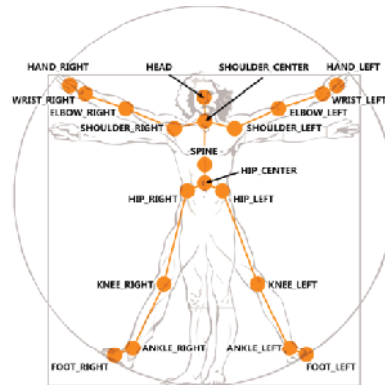


Figura 1: Articulaciones capturadas por el kinect

Plataforma robótica

La plataforma robótica utilizada en este proyecto se muestra en la Figura. 2 Su nombre es ANDI (androide interactivo), desarrollado en la ciudad de Armenia por la empresa Roboti-k. Es un robot humanoide que tiene cinco GDL en cada brazo, dos GDL en la cabeza y uno en la cintura. El robot tiene la capacidad de desplazarse utilizando un modelo con llantas diferencial. Los servomotores utilizados en el robot son Dynamixel RX-24F para los hombros y codos y AX-12 en el resto de las articulaciones.

Software

El software utilizado para el desarrollo del proyecto fue Visual Studio 2010, por su compatibilidad con el SDK de Microsoft para el sensor Kinect. El proyecto fue desarrollado en C#. El protocolo de comunicación serial RS232 fue usado para la comunicación con el robot, usando un puerto virtual a 9600 baudios, con 1 bit de parada y sin bits de paridad.



Figura 2: ANDI, androide interactivo

Problema de imitación

Hay que tener ciertas consideraciones en cuenta cuando se va a trasladar movimiento desde un operario; esto debido a las diferencias físicas entre el brazo humano y el brazo de la plataforma robótica, éstas pueden ser de velocidad, amplitud o simplemente cantidad en grados de libertad. Por ejemplo, el hombro humano es una de las articulaciones más complejas del cuerpo, ya que tiene tres grados de libertad, dos de los cuales tienen un rango de, estas características son muy difíciles de igualar para un androide, razón por la cual se deben imponer ciertas restricciones. A continuación se hace un breve análisis sobre las articulaciones de un brazo humano y del brazo de ANDI.

Articulaciones humanas

El brazo humano tiene 6 GDL. Los tres primeros se encuentran en la articulación del hombro, uno en el codo y dos en la muñeca. Los movimientos de pitch y de roll tienen una amplitud de , mientras que el de yaw es de para el hombro. El GDL del codo puede tener inclinaciones de casi . Para la muñeca se tiene en el GDL yaw y para el pitch. Una descripción gráfica de los grados de libertad de un brazo humano se muestran en la Figura. 3

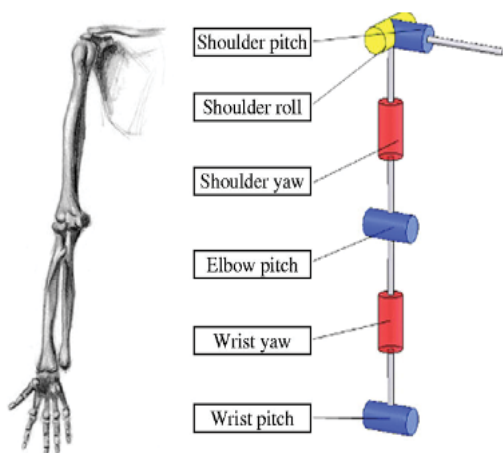


Figura 3: Grados de libertad del brazo humano [5]

Articulaciones del robot

La plataforma que se utilizó en este proyecto tiene en total 13 articulaciones, 5 de ellas en cada brazo, 2 en la cabeza y 1 en la cintura como se muestra en la Fig 4. Dependiendo de la articulación se utilizan diferentes tipos de servomotores, para los hombros y codos se utilizan Dynamixel RX-24F y para las demás articulaciones Dynamixel AX-12.



Figura 4: Grados de libertad de ANDI

En el hombro de ANDI se tienen 2 GDL (pitch y roll), en el codo tiene 1 GDL y en la muñeca 2 GDL; de modo que no se tiene una diferencia muy grande en ese sentido con un brazo humano, ya que la única diferencia es el yaw del hombro, donde se tiene una diferencia más notable es en las amplitudes de los movimientos, ya que en el robot, se tiene un rango de en los hombros y de en el codo, frente a los casi de rango en estos mismos movimientos del cuerpo humano.

Calculo de los ángulos

Para que el robot mueva una articulación, se debe transmitir el ID del servo que se quiere mover, el ángulo destino y la velocidad del movimiento. Por esta razón lo primero que se debe hacer es calcular los ángulos de cada uno de los movimientos que se van a enviar. Con la lectura del Kinect se tienen las coordenadas X,Y,Z de cada una de las articulaciones, y a partir de éstas se pueden calcular los ángulos deseados utilizando las distancias entre articulaciones y fórmulas trigonométricas. El ángulo del codo se calcula utilizando el producto punto de dos vectores, finalmente se obtiene (1)

$$\theta_1 = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + l_2^2 - \|p\|^2}{2l_1l_2} \right) \quad (1)$$

Donde es la distancia euclidiana entre el hombro y el codo, entre el codo y la muñeca; y es la distancia entre

el hombro y la muñeca. Al ser distancias euclidianas entre dos puntos en tres dimensiones se calculan utilizando (2)

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (2)$$

En la Formula 2. se observan las distancias necesarias para el cálculo del ángulo i_4

El cálculo para los ángulos de los hombros es mas sencillo, ya que sólo se necesitan dos articulaciones (hombro y codo) que se obtienen utilizando fórmulas trigonométricas básicas, dependiendo del GDL que se quiera calcular, se utilizan ciertas coordenadas de las articulaciones, los ángulos para los dos GDL del hombro son calculados en (3) y (4)

$$i_1 = \cos^{-1} \left(\frac{c_y}{\sqrt{c_x^2 + c_y^2}} \right) \quad (3)$$

$$i_2 = \cos^{-1} \left(\frac{c_z}{\sqrt{c_x^2 + c_z^2}} \right) \quad (4)$$

Donde c_x , c_y y c_z son las diferencias entre las coordenadas del codo y las del hombro. En la Figura. 5 se observa el esquema de las articulaciones y ángulos del hombro y el codo en el brazo humano.

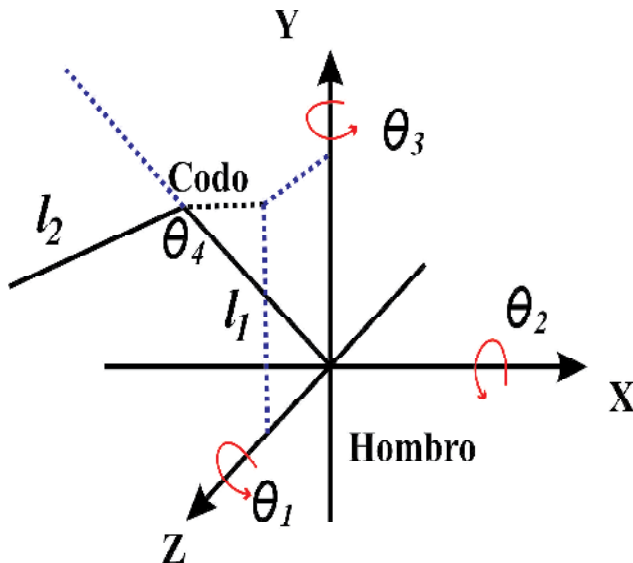


Figura5: Articulaciones y ángulos del brazo

Por restricciones de ANDI, el ángulo i_3 no es calculado, ya que el robot no cuenta con este movimiento.

Mapeo de los ángulos

Como se mencionó anteriormente, la principal diferencia entre el robot y el cuerpo humano, son los rangos de movimientos en los GDL, que en el robot son mucho más pequeños, razón por la cual se deben poner ciertas reglas para evitar daños en el robot en-

viándole ángulos que no puede lograr o que realice movimientos no deseados.

La primera de estas reglas es la limitación de los ángulos, para cada uno de los GDL en hombros y codos del robot se cumple la regla presentada en (5)

$$i_r = \begin{cases} 0, & \text{si } i_h < 0, \\ i_h, & \text{si } 0 < i_h < i_{\max} \\ i_{\max}, & \text{si } i_h > i_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

Para el caso de los hombros, $i_{\max} = 70^\circ$ y para los codos, $i_{\max} = 60^\circ$.

Otra regla que se utiliza para el mapeo de ángulos en los hombros minimiza considerablemente movimientos no deseados en los ángulos i_1 y i_2 . Esta regla se utiliza para disminuir el efecto de las oclusiones en ciertos movimientos de la persona ya que pueden ocasionar la obtención de ángulos errados por parte del kinect. Esta regla es mostrada en (6) y (7).

$$i_1 = 0.6 c_x \pm 10 \quad (6)$$

$$i_2 = 0.6 c_z \pm 10 \quad (7)$$

Adaptación de los datos

La tasa de captura para esta aplicación con el Kinect es de 15fps aproximadamente, en cada frame capturado se calculan los ángulos mencionados anteriormente, pero no todos son enviados al robot porque se pierde fluidez en los movimientos, las coordenadas de las articulaciones no siempre son acertadas y pueden haber ángulos inexactos que ocasionen movimientos bruscos en la plataforma o simplemente porque se puede estar reconociendo el esqueleto equivocado. Por estas razones se implementaron diferentes técnicas de optimización que mejoran el rendimiento del motion retargeting.

Filtro mediana

Un filtro mediana de longitud 19 es aplicado a cada uno de los 6 ángulos obtenidos, de tal forma que se descartan algunos ángulos productos del ruido del Kinect que ocasionarían movimientos bruscos en la plataforma. De esta forma se reduce notoriamente el ruido a cambio de un pequeño lag en la respuesta del sistema.

Reconocimiento de un solo esqueleto

El Kinect es capaz de reconocer más de un esqueleto simultáneamente, si no se tiene una regla clara de cuál de ellos manejará el robot, se podrían presentar movimientos inadecuados, oclusiones y acciones involuntarias que podrían causar problemas en la plataforma. La forma de elegir una sola persona es dibujando una cara en la imagen, la persona que ubique su cara sobre la cara de la imagen obtiene el control de la plataforma hasta que salga de la imagen, ninguna otra persona que aparezca en escena tendrá ningún efecto sobre el robot.

Suavizado de movimientos

Si se enviaran todas las posiciones obtenidas y suavizadas con el filtro mediana, para las trayectorias largas se obtendrían una serie de "micro-movimientos" llevarían la articulación paso a paso hasta el ángulo final, lo que tendría como resultado una fluidez muy baja en los movimientos amplios. Para evitar el efecto de los movimientos paso a paso se implementó una técnica que considera la diferencia entre el ángulo actual y el ángulo anterior para enviar los movimientos al robot, el algoritmo es mostrado en la Figura. 6

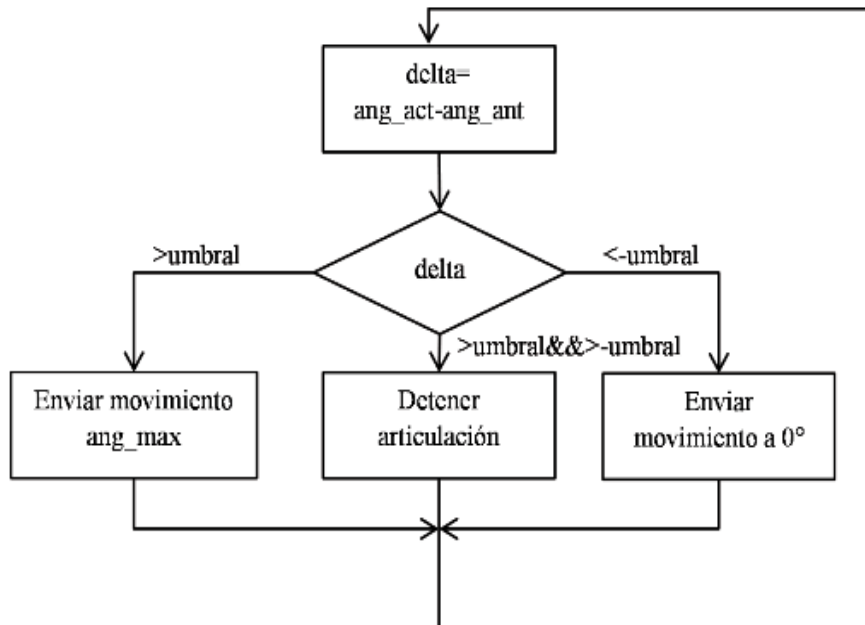


Figura 6: Diagrama de flujo para el suavizado de los movimientos

De esta forma, en cada iteración se compara el ángulo actual con el anterior y la acción enviada al robot solo es actualizada si cambia el estado en la variable delta, de modo que si, por ejemplo, el hombro del operario continúa subiendo entre varios frames, al robot solo se envía una vez que vaya al ángulo máximo, una vez se detenga el movimiento del operario, la variable delta será menor a un umbral y se enviará la orden de detener el movimiento en esa articulación.

Resultados

Finalmente, después de obtener, mapear y transmitir los ángulos oportunos al robot, se logró enviar los movimientos de un operario a una plataforma robótica utilizando el Kinect como medio de captura, el sistema tiene un lag menor a 1 segundo, que para estos

fin es aceptable, ya que no se requiere una respuesta instantánea de la plataforma. En la Figura. 7 se muestra como la plataforma imita los movimientos de los brazos del operario.



Figura 7: Resultado final

Conclusiones

Se implementó satisfactoriamente un algoritmo de motion retargeting para manipular un robot humanoide inalámbricamente utilizando el Microsoft Kinect.

Se implementaron diferentes técnicas de acondicio-

namiento de la señal para realizar movimientos más fluidos en la plataforma, como el filtro mediana y la técnica de cambio de velocidad con un ángulo fijo.

Se implementó una interfaz gráfica en lenguaje de programación C# en el IDE visual studio que permite empezar la redirección de los movimientos de manera fácil e intuitiva

BIBLIOGRAFÍA

1. V. V. Nguyen and J.-H. Lee, Full-body imitation of human motions with kinect and heterogeneous kinematic structure of humanoid robot. In System Integration (SII), 2012 IEEE/SICE International Symposium on, Dec 2012, pp. 93–98.
2. N. Pollard, J. Hodgins, M. Riley, and C. Atkeson, Adapting human motion for the control of a humanoid robot. In Robotics and Automation. 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on, vol. 2. 2002. pp. 1390–1397 vol.2.
3. Kinect for windows. [Internet]. Microsoft. [Consultado en 2014]. Disponible en: <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>
4. H.-H. Hsu, Y. Chiou, Y.-R. Chen, and T. Shih, Using kinect to develop a smart meeting room. In Network-Based Information Systems (NbiS), 2013 16th International Conference on Sept 2013. pp. 410–415.
5. A. de Estudiantes Reset. [Internet]. [Consultado en 2010]. Brazo robótico. Disponible: <http://reset.etsii.upm.es/es/projects/robotic-arm/>

SISTEMA EMBEBIDO PARA EL RECONOCIMIENTO DE ESCRITURA SOBRE PLATAFORMA LINUX EMBEBIDO

EMBEDDED SYSTEM FOR THE RECOGNITION OF WRITING ON EMBEDDED LINUX

Freddy Rodrigo Mendoza Ticona¹

¹. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
E-mail: freddy12120@gmail.com

Recibido: 3 Diciembre

Aceptado: 15 Diciembre

*Correspondencia del autor. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú,
E-mail: freddy12120@gmail.com

RESUMEN

En este artículo se presenta un sistema embebido para el reconocimiento de escritura o caracteres utilizando redes neuronales artificiales, el tipo de RNA que se utiliza es el mapa auto-organizado (Self Organizing Map o SOM) porque consume menos recursos de memoria y es de bajo coste computacional. El hardware utilizado la tarjeta de desarrollo beaglebone black conectada a una pantalla táctil resistiva, la tarjeta beaglebone black cuenta con un procesador ARM Cortex-A8 y posee como sistema operativo linux embebido. Se realiza una interfaz gráfica mediante la biblioteca Qt para linux embebido, en esta interfaz se ingresan los caracteres por medio de un lápiz táctil (stylus) para posteriormente extraer las características de la imagen y procesarlas. El sistema implementado se prueba como parte de una aplicación de calculadora que realiza las cuatro operaciones elementales, y por último, se realizó la evaluación del desempeño del mapa auto-organizado (SOM).

Palabras claves: Beaglebone black, mapa auto-organizado (SOM), linux embebido, pantalla táctil resistiva, Qt embebido, Red neuronal artificial RNA, sistema de reconocimiento de caracteres.

ABSTRACT

In this article, an embedded system for handwriting recognition or characters using artificial neural networks is presented. The type of RNA that is used is the self-organizing map (SOM Self Organizing Map) because it consumes less memory and it is low computational cost. The hardware development board used was the BEAGLEBONE black connected to a resistive touch screen. The card has a black BEAGLEBONE ARM Cortex-A8 processor and has as Linux embedded operating system. A graphical interface using the Qt library for embedded linux. In this interface, characters were entered using a touch pencil and then extract features from the image and process them. The implemented system was tested as part of a calculator application that performs the four basic operations, and finally, the evaluation of the performance of self-organizing map (SOM) was held.

Keywords: BEAGLEBONE black, self-organizing map (SOM), embedded linux, resistive touch screen, embedded Qt Artificial Neural Network RNA, character recognition system.

INTRODUCCIÓN

El reconocimiento de escritura (Handwritten Recognition o HWR) consiste en la capacidad de interpretar de forma transparente la escritura hecha por el hombre, de diferentes fuentes como documentos, una fotografía o pantallas táctiles. Existen dos enfoques el reconocimiento en línea (Online) y fuera de línea (Offline) (1), en este último se escanea la escritura de una hoja de papel, esto es llamado reconocimiento óptico de caracteres (optical character recognition o OCR), y en el Online se ingresan los caracteres en una superficie táctil, donde la tarea consiste en interpretar el movimiento del lápiz táctil (stylus) a través de la superficie táctil y convertirlo en texto digital, lo último se implementa en tablets, celulares o algún otro dispositivo. Este tema ha sido extensamente estudiado por un gran número de investigadores en todo el mundo y varias técnicas han sido propuestas, se ha hecho el reconocimiento de caracteres y palabras en varias lenguas (2), (3). Sin embargo, el reconocimiento de escritura sigue siendo una tarea difícil de realizar, debido principalmente a los diferentes estilos en la escritura. Diferentes tipos de algoritmos han sido empleados para el reconocimiento de escritura como la Máquina de Soporte Vectorial (SVM), Perceptron Multicapa (4), Mapa auto-organizado (SOM) (5), lógica difusa y varias combinaciones de estos algoritmos (6), básicamente los algoritmos consisten en la clasificación de patrones o reconocimiento de patrones. Las aplicaciones son variadas, así por ejemplo en compañías postales con el propósito de ordenar automáticamente paquetes haciendo una lectura de sus direcciones de destino, en el manejo de votos electorales, el reconocimiento de firmas y también en aplicaciones de software para el reconocimiento óptico de una imagen de texto para convertirlo a formato digital con la finalidad de almacenarlos en formato digital.

ARQUITECTURA DEL SISTEMA EMBEBIDO

El principal objetivo de este trabajo es realizar una aplicación de software para el reconocimiento Online de números y símbolos matemáticos, y se prueba como una calculadora, es decir, implementa el reconocimiento de los símbolos de entrada y luego calcula la operación deseada. Esta aplicación es implementada en lenguaje C++ utilizando dos APIs conocidas, Qt library (7) para el manejo de la interfaz gráfica y OpenCV (8) para realizar los algoritmos de procesamiento de imágenes, esta aplicación se construye

sobre Linux embebido y se ejecuta sobre una computadora embebida llamada Beaglebone Black (9), esta tarjeta de bajo coste posee como procesador un ARM Cortex-A8, 512MB de DDR3L RAM y Angstrom Linux (10) como sistema operativo. Angstrom Linux esta diseñada para dispositivos ARM y es ideal para este tipo de arquitectura.

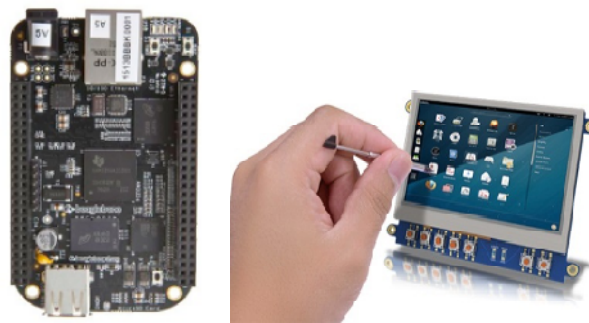


Figura 1. Tarjeta de desarrollo Beaglebone black y Beaglebone black con la LCD 4DCAPE-43T

La tarjeta de desarrollo Beaglebone black es una computadora embebida que tiene Angstrom Linux (otras distribuciones pueden ser instaladas), cuenta con varios puertos GPIO, conexión USB, puerto Ethernet, etc. El linux embebido que posee soporta una variedad de librerías de varios lenguajes de programación ideal para el desarrollo de aplicaciones embebidas, como por ejemplo OpenCV library y Qt embedded library. Para poder ejecutar la tarea de reconocimiento de escritura, el sistema cuenta con una pantalla táctil resistiva 4DCAPE-43T de 4.3" y 480x272 de resolución como se puede ver en la Figura. 1, la aplicación en QT se muestra en esta pantalla.

Modelo del Sistema

La metodología usada para construir el sistema de reconocimiento se puede apreciar en la Figura. 2, consiste en la Adquisición de los datos, Segmentación de los datos, extracción de características de los símbolos y la clasificación de patrones. Posteriormente se evalúan las operaciones matemáticas necesarias para obtener el resultado final.

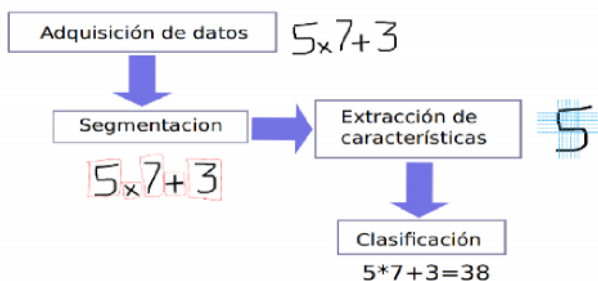


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de reconocimiento

Adquisición de datos

En esta parte se elabora la interfaz de usuario usando la biblioteca QT y la pantalla táctil, se ingresan los datos por medio de un lápiz táctil al área de trabajo, como se muestra en la Fig. 3, los datos se guardan como imágenes en escala de grises.



Figure 3. Adquisición de datos

Segmentación

Un segmento es un dígito o en general un símbolo, en esta parte se separa cada símbolo, esto se consigue rastreando las coordenadas del lápiz táctil, se hace uso de los eventos de mouse que proporciona la librería Qt para obtener las coordenadas de los píxeles trazados, con esta información se encierra el símbolo en una área rectangular mínima dando flexibilidad al sistema de posicionar los símbolos en cualquier parte del área de trabajo. La imagen de cada símbolo se almacena temporalmente en memoria para luego realizar la extracción de características de cada uno.

Extracción de características

Existen principalmente dos formas de considerar las características de cada símbolo, una es tomando todos los píxeles de la imagen, esto da buenos resultados pero requiere más cálculo computacional y por lo tanto mayor tiempo en obtener la respuesta, además la imagen tendría que ser de un tamaño fijo.

Por otro lado, se suele hacer una reducción en la cantidad de características mediante la codificación de cada símbolo, debido a que la imagen está en formato binario, se extrae el número de transiciones de 0 a 1 (líneas negras vistas verticalmente y horizontalmente) como en la Figura. 4, con esta técnica los símbolos pueden ser de diferentes tamaños y formas, dando mayor flexibilidad al sistema embebido.

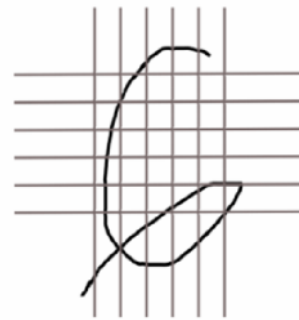


Figura 4. Posicionamiento de las líneas verticales y horizontales para la extracción de características de un símbolo.

Tanto las líneas verticales como horizontales están separadas de forma homogénea, se elige trazar 6 líneas tanto verticales como horizontales, teniendo un total de 12 características y el espaciado entre líneas que se elige es de $1/8$ de la dimensión vertical y horizontal (11), con esto se consiguen buenos resultados en la clasificación.

$$P = [n_1 \ n_2 \ n_3 \ n_4 \ n_5 \ n_6 \ n_7 \ n_8 \ n_9 \ n_{10} \ n_{11} \ n_{12}]^T \quad (1)$$

La Eq. 1 muestra un ejemplo de un patrón que representa un símbolo, esta forma de vector de características se utiliza en la etapa de clasificación.

MAPA AUTO-ORGANIZADO (SOM)

El mapa auto-organizado (self organizing map) o también llamado mapa de kohonen es un tipo de red neuronal de aprendizaje no supervisado competitivo, este algoritmo traslada un espacio de entrada de alta dimensión a un espacio de salida de baja dimensión conservando la topología del espacio de los datos de entrada, tienen la habilidad de encontrar similitudes en los datos y tienen la propiedad especial de crear de forma efectiva representaciones internas especialmente organizadas de varias características de las señales de entrada y sus abstracciones (12).

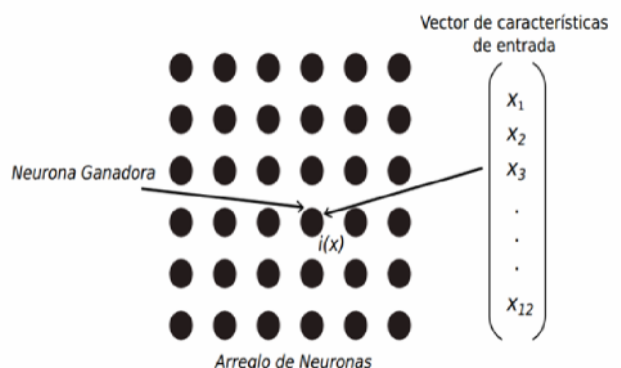


Figura 5. Mapa auto-organizado de Kohonen.

En el mapa auto-organizado se tiene a las neuronas en los nodos de una rejilla que es usualmente de dos dimensiones que puede ser rectangular o hexagonal como se puede ver en la Fig. 5, un mapa topográfico es automáticamente organizado por un proceso cíclico de comparación de los patrones de entrada con el vector de pesos de cada neurona, la neurona que posee el vector de pesos más cercanos al vector de entrada es llamada neurona ganadora, el algoritmo consiste primero en inicializar los pesos de la red aleatoriamente, luego existen tres procesos esenciales involucrados en la formación del mapa auto-organizado (13).

Competencia

Dado un vector de entrada como en la Figura. 5 se encuentra la neurona más cercana al vector de entrada, el criterio de esta medida se basa en la distancia Euclidiana.

$$i(\mathbf{x}) = \arg \min |\mathbf{x} - \mathbf{w}_j|, j = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

Cooperación

La neurona ganadora (BMU) es el centro de una vecindad topológica de cooperación, se usa la función gaussiana como función de vecindad, las neuronas que se encuentren dentro de la vecindad de la BMU son actualizadas.

$$h_{j,i(x)}(n) = \exp\left(-\frac{d_{j,i}^2}{2\sigma^2(n)}\right) \quad (3)$$

La función de vecindad decae con la distancia en el mapa de Kohonen y también con el tiempo.

$$\sigma(n) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{n}{\chi_1}\right) \quad (4)$$

Donde: $i(\mathbf{x})$, representa la ubicación de la neurona ganadora y j , representa las demás neuronas. La distancia entre neuronas tiene la siguiente expresión.

$$d_{j,i}^2 = |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2 \quad (5)$$

Adaptación

Los pesos de las neuronas se actualizan en dirección a los patrones de entrada de la siguiente manera.

$$\mathbf{w}_j(n+1) = \mathbf{w}_j(n) + \eta(n) h_{j,i(x)}(n)(\mathbf{x} - \mathbf{w}_j(n)) \quad (6)$$

Donde la tasa de aprendizaje disminuye con el tiempo.

$$\eta(n) = \eta_0 \exp\left(-\frac{n}{\chi_2}\right) \quad (7)$$

El número de iteraciones varía de acuerdo al problema, pero no depende del número de muestras presentes en el espacio de entrada, además al inicio del algoritmo se debe tener una función vecindad que cubra casi todo el arreglo y la tasa de aprendizaje debe ser cercano a la unidad, en este artículo se eligió un arreglo rectangular de 15x15.

Clasificación

Una vez realizado el entrenamiento de la red neuronal se asigna la clase a que pertenece cada neurona, esta es la clase de la mayoría de muestras de entrada que son los más cercanos a dicha neurona, se puede ver un ejemplo en la Fig. 6, luego el mapa está listo para clasificar muestras desconocidas que no participaron en el entrenamiento (generalización) mediante el criterio de similitud o vecino más cercano.

4	9	4	4	7	7	7	9	9	9	8	8	8	4	4
4	4	4	4	9	7	7	9	9	9	8	8	1	1	4
4	4	4	4	9	7	7	7	9	7	9	1	1	1	7
4	4	4	4	4	2	7	7	9	7	1	1	1	4	2
5	5	4	4	4	9	7	7	7	1	1	1	8	1	5
5	5	8	9	8	8	7	7	7	1	1	1	9	8	0
5	5	5	8	8	8	8	7	1	1	1	6	5	6	0
0	5	8	8	8	8	8	2	2	8	6	6	6	0	0
0	0	0	8	8	8	2	2	2	6	6	6	0	0	0
0	0	5	5	8	8	2	2	2	2	6	6	0	0	0
0	0	0	5	5	3	3	2	2	2	6	6	6	0	0
0	0	0	5	3	3	3	3	2	2	2	6	6	6	6
6	0	5	3	3	3	3	3	2	2	2	2	6	6	6
6	8	9	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	6	4
4	9	9	7	7	3	3	3	8	2	2	2	2	2	4

Figura 6. Mapa de características entrenada usando el algoritmo de aprendizaje SOM.

RESULTADOS

Se entrena el mapa auto-organizado (SOM) con un total de 1288 muestras (train samples) y se evalúa el desempeño del mapa con 538 muestras (test samples). Las muestras de entrenamiento fueron capturadas mediante la interfaz gráfica y posteriormente enviadas a la PC por medio del protocolo SSH (Secure SHell File Transfer Protocol), el entrenamiento se puede hacer en la misma tarjeta de desarrollo pero por comodidad se realizó en la PC usando el entorno de desarrollo QT creator, luego la matriz de pesos obtenida se envía en formato YAML a la tarjeta Beaglebone Black, este formato es fácilmente interpretado por la biblioteca OpenCV. Una vez entrenada el mapa auto-organizado (SOM) el sistema funciona independientemente como una calculadora con las cuatro operaciones elementales, además se obtiene una precisión del 86.3 %

en la clasificación de los patrones de ensayo, el sistema embebido implementado en este artículo funciona correctamente y con retardo de procesamiento mínimo.

Tabla 1 Precisión obtenida en el reconocimiento de muestras de ensayo

	Muestras de entrenamiento	Muestras de ensayo
Técnica	Precisión(%)	Precisión(%)
SOM	96.1	86.3



Figura 7. Plataforma de hardware del reconocimiento de símbolos escritos a mano

CONCLUSIÓN

Una técnica de reconocimiento de escritura usando el mapa auto-organizado (Self-organizing maps o SOM) es presentado en este artículo, se implementa un sistema embebido que funcione como una calculadora usando la tarjeta de desarrollo Beaglebone black con una pantalla táctil, se realizó una aplicación de software en Qt para la interfaz de usuario y demás operaciones del sistema embebido, todo la aplicación esta hecha en lenguaje C++. La red neuronal SOM es usada para categorizar e identificar los dígitos y los operadores matemáticos ingresados por el usuario, la red neuronal fue hecha para trabajar con un número reducido de características dando mayor rendimiento al sistema. Por último, se obtiene buenos resultados en el entrenamiento de la red neuronal y en la precisión de clasificación de los patrones de ensayo. Trabajos futuros están enfocados en el aumento de la precisión obtenida con una mezcla de técnicas y también aumentar los símbolos que serán clasificados, como por ejemplo el reconocimiento de letras del alfabeto español, una mejor opción es diseñar una arquitectura de hardware en un FPGA para un reconocimiento de escritura más sofisticado pudiendo usar reconfiguración parcial dinámica, con la combinación de un procesador secuencial (ARM) y un FPGA.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Wang, Group for User Interface Research, University of California, Berkeley, "Online Handwriting Recognition Technology-State of the Art", 2003.
2. B. Alijla and K. Kwaik, "OIAHCR: Online Isolated Arabic Handwritten Character Recognition Using Neural Network", in The Int. Arab Journal of Information Technology, Vol.9, No.4, 2012, 343-351.
3. Qizhen He, "A Hybrid Language Model for Handwritten Chinese Sentence Recognition", in Int. Conf. on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR)}, Bari, 2012, 129-134.
4. B. K. Verma, "Handwritten Hindi character Recognition using multilayer Perceptron and radial basis function neural network", Proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks, 2002, 2111-2115.
5. D. Gil and M. Jhonsson, "Supervised SOM Based Architecture versus Multilayer Perceptron and RBF Networks", Proc. of the Linkoping Electronic Conf., 2010, 15-24.
6. Z. Chi, J. WU and H. Yan, "Handwritten Numeral Recognition using Self-organizing maps and fuzzy rules", in Pattern Recognition, Elsevier Ltd., Vol. 28, No. 1, 1995, 59-66.
7. Qt Digia, Documentation Qt 4.8 library. [Online]. Available: <http://qt-project.org/doc/qt-4.8/classes.html>
8. OpenCV community, OpenCV API Reference. [Online]. Available: <http://docs.opencv.org/2.4.6>
9. BeagleBoard.org Foundation. [Online]. Available: [http://beagleboard.org/Products/BeagleBone Black](http://beagleboard.org/Products/BeagleBone%20Black)
10. The Angstrom Distribution Project, <http://www.angstrom-distribution.org/>
11. E.~Bouvet, "An FPGA Embedded System Architecture for Handwritten Symbol Recognition", in 16th Electrotechnical Conf. (MELECON), Yasmine Hammamet, 2012, 653 - 656.
12. T. Kohonen, "The Self-Organizing Map", Proc. of IEEE, Vol.78, No. 9, 1990, 1464-1480.
13. S. Haykin, "Self-Organizing Maps", in Neural Networks: A Comprehensive Foundation, 2th ed. Prentice-Hall, 1999, ch. 9, sec.3, 468-476.

RECONSTRUCCIÓN DE CAMPOS DE LUZ A PARTIR DE PROYECCIONES 2D BASADO EN MUESTREO COMPRESIVO

LIGHT FIELD RECONSTRUCTION FROM 2D PROJECTIONS BY COMPRESSIVE SENSING

Kareth León¹, Laura V. Galvis², Henry Arguello Fuentes³

¹. Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

E-mail: kareth.leon@correo.uis.edu.co

². Electrical and Computer Engineering Department, University of Delaware, Newark, DE, USA

³. Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Recibido: 3 Diciembre

Aceptado: 15 Diciembre

*Correspondencia del autor. Escuela de Ingeniería de Sistemas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

E-mail: kareth.leon@correo.uis.edu.co

RESUMEN

La fotografía de campos de luz ha ganado popularidad recientemente debido a sus capacidades para el procesamiento de imágenes. La captura de campos de luz es una técnica que almacena información espacial y angular de una señal óptica proveniente de un objeto tridimensional en una representación de cuatro dimensiones (4D). La adquisición de campos luz en alta resolución sigue siendo un desafío, y aunque existen cámaras comerciales de campo de luz, estos dispositivos sacrifican resolución espacial para ofrecer diferentes vistas angulares de la misma escena. Un nuevo enfoque para obtener alta resolución en campos luz es el uso de la técnica de muestreo compresivo (CS) desarrollada recientemente. El elemento esencial en CS es el proceso de codificación, que puede ser realizado a través de máscaras litográficas. En este trabajo, se presenta un modelo de adquisición de campos de luz usando muestreo compresivo por patrones de codificación. Esta investigación busca reconstruir un campo de luz de alta resolución a partir de una sola proyección 2D. En el modelo, la información redundante de las diferentes vistas angulares del campo de luz es aprovechada por la modulación a través de los patrones de codificación, y luego se soluciona un problema mal condicionado a través de técnicas de codificación dispersa. Con el objetivo de utilizar las técnicas de codificación dispersa, se asume un diccionario donde las imágenes naturales son altamente compresibles. Inicialmente, se realiza el entrenamiento de un diccionario usando 5000 muestras de campos de luz de entrenamiento con el objetivo de encontrar la representación del campo de luz más dispersa y así, reconstruir el campo de luz 4D. Para la reconstrucción, se obtiene un campo de luz con 5×5 vistas angulares a partir de una sola proyección codificada 2D. La proyección codificada 2D es dividida en parches superpuestos, luego cada parche 2D es reconstruido y fusionado usando un filtro de mediana para obtener finalmente el campo de luz 4D. Los resultados indican el alto PSNR (pico de señal a ruido) de las imágenes 4D reconstruidas.

Palabras claves: Fotografía computacional, campo de luz, muestreo compresivo.

ABSTRACT

Light field photography has gained popularity recently due to its imaging capabilities. The light field is a technique that stores the spatial and angular information of an optical signal from a three-dimensional object in a four-dimensional (4D) representation. The acquisition of high-resolution light fields is still a challenge, although there exist commercial light field cameras, those devices trade spatial resolution by offering different views of the same scene. A novel approach to obtain high-resolution light fields is by using the recently developed technique of compressive sensing (CS). The essential element in CS is the codification process, which can be realized by lithographic masks. In this work, a compressive sensing light field camera model based on codification by mask patterns is presented. This research tries to recover a high-resolution light field from a single 2D projection. In the model, the redundant information in the different views of a light field is exploited by the modulation through mask patterns and then an ill-posed underdetermined problem is solved by sparse coding techniques. In order to use the sparse techniques, it is assumed a dictionary where the natural images are compressible enough. Simulations of a dictionary-learning are first performed using a complete dictionary with 5000 light field samples to find the sparsest representation of the light field in order to reconstruct the 4D light field. For the sparse reconstruction, a light field with a 5x5 views is obtained from a single coded 2D projection. The 2D projection is divided into overlapping patches, and then each 2D patch is reconstructed and merged with a median filter to finally obtain the 4D light field. The results indicate the high PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) of the reconstructed 4D images.

Keywords: Computational photography, Light field, Compressive sensing

I. INTRODUCCION

Un campo de luz se define como el flujo de rayos que viajan en cada posición y cada dirección del espacio, esto conlleva a tener dimensiones espaciales y angulares en un arreglo de 4 dimensiones (4D) (1). Este concepto se fundamenta en la parametrización de la luz considerada sobre el espacio de rayos 5D o función plenoptic (2), se consideran tres dimensiones para cada posición espacial y dos dimensiones para cada dirección del flujo. La restricción de la función plenoptic permite la reducción de 5D a 4D, o campo de luz, haciendo pasar el rayo de luz por dos planos paralelos, eliminando así, una dimensión (2, 3).

En la literatura se encuentran métodos tradicionales para la captura y construcción de campos de luz. Una primera aproximación, usa un arreglo de lentes para captar una escena, generando una red de muestras angulares ordenadas similar a una fotografía integral (4). Emplear matrices de microlentes ubicados entre el lente principal y el sensor en el sistema hizo posible la captura del campo de luz a partir de una sola adquisición. De esta forma, cada microlente, permite capturar información angular. Estas aproximaciones demandan recursos computacionales considerables, debido al procesamiento necesario para la generación y almacenamiento de las imágenes captadas. Actualmente, las técnicas de captura de campos de luz están

avanzando hacia aperturas codificadas que modulan los rayos de luz (5). Estas permiten o bloquean el paso de luz proporcionando una captura reducida de la escena en la que se descartan valores redundantes que no aportan mayor información.

Este trabajo se basa en dichas aperturas codificadas. Para la captura y procesamiento óptimo de los campos de luz se tienen en cuenta tres componentes claves: los átomos de campo de luz, que son los bloques fundamentales de construcción de campos de luz natural; un diseño óptico optimizado, para la captura de proyecciones de campo de luz en 2 dimensiones (2D); y un método de dispersión robusto, para la reconstrucción de campos de luz 4D (5). Se plantea simular la obtención de proyecciones de campos de luz en 2D y a partir de éstas, reconstruir el respectivo campo de luz en 4D y evaluar la calidad de su reconstrucción, bajo la premisa de que es posible su representación en algún diccionario.

II. Reconstrucción de Campos de Luz

Una imagen capturada en un sensor o cámara es la proyección de un campo de luz que contiene tanto información espacial como angular. La inclusión de una máscara de codificación a cierta distancia d del sensor, modula ópticamente la proyección del campo de luz. En notación discreta, esta proyección del campo

de luz puede expresarse como

$$\mathbf{i} = \Phi \mathbf{l}, \quad \Phi = [\Phi_1 \ \Phi_2 \dots \Phi_{v_2}], \quad (1)$$

donde $\mathbf{i} \in \mathbb{R}^m$ y $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^{n \times d}$ representan la imagen capturada y el campo de luz respectivamente en forma vectorizada, donde $m \ll n$. El campo de luz está compuesto por un conjunto de vistas angulares de $v \times v$ que se encuentran apiladas en $\mathbf{l}$. Las submatrices $\Phi_j \in \mathbb{R}^{m \times m}$ son matrices dispersas que contienen en su diagonal códigos aleatorios de 1s y 0s, donde los valores en 0 bloquean la luz.

El problema inverso de reconstruir un campo de luz de sus respectivas proyecciones codificadas requiere invertir el sistema lineal de ecuaciones en (1). Debido a que el problema es un problema subdeterminado, pues se cuenta con más incógnitas (rayos de luz) que ecuaciones o medidas conocidas (pixeles del sensor), se aplican técnicas de codificación dispersa. Para hacerlo, se asume que los campos de luz son dispersos en alguna base o diccionario $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times d}$, tal que

$$\mathbf{i} = \Phi \mathbf{l} = \Phi \mathbf{D} \boldsymbol{\alpha}, \quad (2)$$

donde $\boldsymbol{\alpha} \in \mathbb{R}^d$ contiene la mayoría de sus coeficientes en 0.

Se busca, entonces, reconstruir el conjunto de coeficientes dispersos $\boldsymbol{\alpha}$ que formen una representación exacta del campo de luz en algún diccionario $\mathbf{D}$. La solución a (2) puede plantearse como la respuesta al problema,

$$\begin{aligned} & \text{minimizar}_{\{\boldsymbol{\alpha}\}} \|\boldsymbol{\alpha}\|_1 \\ & \text{sujeto a } \|\mathbf{i} - \Phi \mathbf{D} \boldsymbol{\alpha}\|_2 \leq \epsilon, \end{aligned} \quad (3)$$

que es conocido en la literatura entre los métodos de relajación convexa como *basis pursuit denoise* (BPDN), en el cual el parámetro ϵ representa el nivel de ruido capturado por el sensor del sistema. Comúnmente, este problema se formula usando la función Lagrangiana

$$\text{minimizar}_{\{\boldsymbol{\alpha}\}} \|\mathbf{i} - \Phi \mathbf{D} \boldsymbol{\alpha}\|_2 + \lambda \|\boldsymbol{\alpha}\|_1. \quad (4)$$

Este tipo de problemas tienen parte en la teoría de compresión dispersa (*Compressive Sensing* en Inglés), y a partir de algoritmos robustos es posible encontrar una aproximación de la solución (5).

El entrenamiento del diccionario $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times d}$ que representa la señal dispersa se plantea como la solución al problema

$$\begin{aligned} & \text{minimizar}_{\{\mathbf{D}, \mathbf{A}\}} \|\mathbf{L} - \mathbf{D} \mathbf{A}\|_F \\ & \text{sujeto a } \|\mathbf{A}\|_0 \leq k, \end{aligned} \quad (5)$$

donde $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{n \times d}$ es el conjunto de entrenamiento que contiene q señales o parches que representan la señal y $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{d \times q}$ es un conjunto de k coeficientes dispersos.

El planteamiento del problema permite que este se pueda resolver por diferentes métodos, encontrar el que ofrezca una buena representación y alta calidad de reconstrucción es uno de los objetivos de éste trabajo, el cual se buscará basado en el PSNR promedio de todos los parches que compone cada campo de luz reconstruido. Como parámetro adicional, se tiene en cuenta el diccionario a utilizar. El entrenamiento del diccionario a usar en la representación de los campos de luz, afecta la calidad de reconstrucción y es importante tener presente que las imágenes empleadas para realizar dicho entrenamiento hacen que el diccionario adquiera nuevas características, es decir, que un diccionario depende directamente de las imágenes con las que se entrena.

III. Simulaciones y Resultados

Para las simulaciones, se utilizaron los algoritmos implementados en el paquete SPGL1 tales como BPDN (*Basis Pursuit Denoise*) y LASSO [6, 7]. Se cuenta con una base de datos de 5 imágenes de 840 "x" 593 pixeles de resolución espacial y cada una de ellas, cuenta con 5 "x" 5 vistas angulares.

A. Proyecciones codificadas 2D a 4D

Las proyecciones codificadas 2D se recrean a partir de parches o pequeñas ventanas de 8 "x" 8 pixeles, las cuales permiten una reconstrucción 4D del campo de luz; cada parche es reconstruido por cada pixel de la imagen del sensor. Para cada imagen, se calcula la calidad de reconstrucción PSNR (*Peak signal-to-noise ratio*) en decibeles (dB).

B. Entrenamiento de diccionarios

Se realizó el entrenamiento de tres diccionarios diferentes. La parte fundamental de cada diccionario es el conjunto de imágenes sintéticas escogidas para el entrenamiento.

Para cada diccionario, se emplearon cuatro grupos di-

ferentes de imágenes. Luego, mediante estos diccionarios, se realizan las reconstrucciones de tres campos de luz.

C. Reconstrucción a partir de diccionarios entrenados

La Figura 1 ilustra la variación de la calidad en una de las imágenes reconstruida a partir de cada uno de los diccionarios; los valores de PSNR muestran numéricamente el resultado obtenido al utilizar el diccionario 1, 2 y 3 respectivamente. El algoritmo de reconstrucción robusto empleado en la figura 1 es el llamado LASSO.

En las reconstrucciones, se calcula el PSNR de cada ventana o parche; el promedio de los valores del PSNR para cada campo de luz presentado en la figura 1 se muestra en la tabla 1. El diccionario 1 proporciona una calidad de reconstrucción alta respecto a la

obtenida en las reconstrucciones con los diccionarios 2 y 3.

D. Comparación de métodos de reconstrucción

Con el fin de analizar el comportamiento de los diferentes diccionarios y algoritmos de reconstrucción, se realizó un análisis variando estos dos parámetros.

En la tabla 2, se observan los resultados de hacer esta variación en dos conjuntos de imágenes denominados Imagen 1 e Imagen 2. La Fig. 2 muestra el comportamiento de los resultados de reconstrucción de la imagen 1, utilizando los dos algoritmos, BPDN Y LASSO y, teniendo en cuenta los 3 diccionarios entrenados.

Los valores promedio de PSNR para cada campo de luz reconstruido y los respectivos métodos usados para dicha simulación son mostrados en la tabla 2.

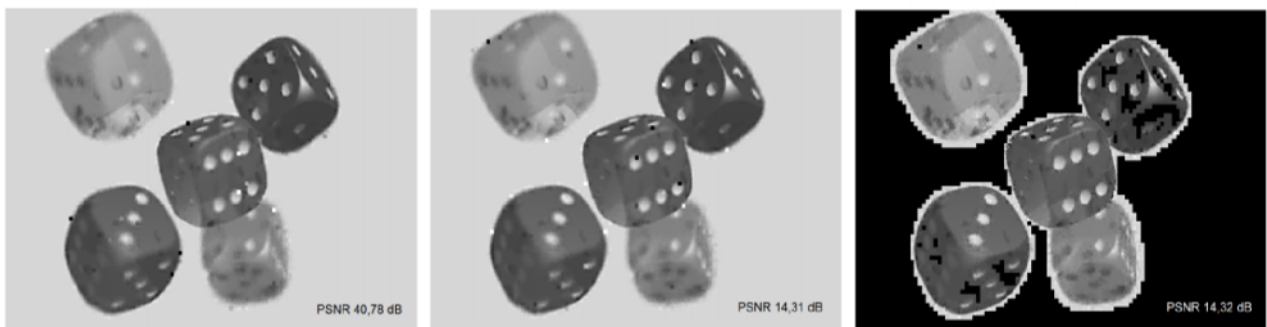


Figura. 1 Evaluación de reconstrucción con diferentes diccionarios; en la imagen de la izquierda se hizo uso del diccionario 1, la imagen del centro fue reconstruida con el diccionario 2 y para la imagen de la derecha se usó el diccionario 3. El algoritmo de reconstrucción empleado fue LASSO.

TABLA I
COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO UTILIZANDO TRES DICCIONARIOS

DICCIONARIO	PSNR prom (Método LASSO)
1	40,781
2	14,318
3	14,325

TABLA II
COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO EN LA RECONSTRUCCIÓN DE DOS IMÁGENES UTILIZANDO TRES DICCIONARIOS Y DOS ALGORITMOS DE RECONSTRUCCIÓN

Imagen a reconstruir	Diccionario	PSNR promedio	
		LASSO	BPDN
Imagen 1	1	35,201	35,711
	2	35,329	35,821
	3	35,237	35,598
Imagen 2	1	40,781	47,294
	2	14,318	47,187
	3	14,325	47,306

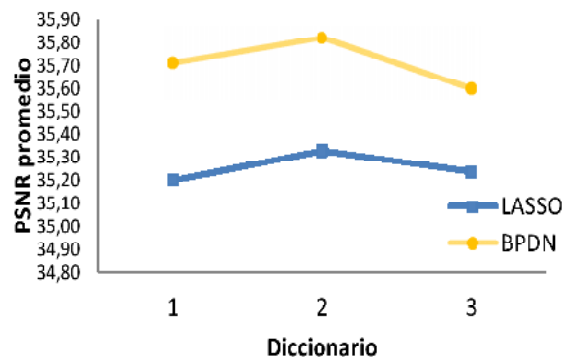


Figura. 2 Comparación gráfica de los resultados de la reconstrucción de la imagen 1. En promedio, se obtiene que la implementación BPDN contribuye en una mejora en la calidad de Reconstrucción.

El algoritmo BPDN proporciona valores altos en los dos campos de luz. Se puede observar en los valores de PSNR de la Imagen 2, una disminución en la calidad considerable, es decir, al utilizar el algoritmo

LASSO, los valores de PSNR obtenidos con los diccionarios 2 y 3 son menores respecto al obtenido con el diccionario 1, contrario a esto, los valores para el algoritmo BPDN no varían significativamente al cambiar el diccionario.

E. Reconstrucción a partir de parches de 9 "x" 9

Adicional a las simulaciones realizadas con parches de 8 "x" 8, se realizaron simulaciones tomando parches de 9 "x" 9 para realizar el entrenamiento de los diccionarios. Con esta simulación se encontraron resultados variables. Para la reconstrucción de la Imagen 1, se obtiene una mejora de la calidad del PSNR promedio, caso contrario sucede para la Imagen 2, en donde se obtiene menor calidad.

En la figura 3, se presenta la reconstrucción con dos tamaños de parches, para el campo de luz de la Imagen 1. Es de notar visualmente que la calidad mejora cuando se toma un parche de mayor tamaño.

Por otro lado, se calculó el PSNR de la reconstrucción del campo de luz de la Imagen 2 y se encontraron resultados opuestos, la calidad obtenida, utilizando parches de 9 "x" 9 fue menor en comparación con la obtenida a través de parches de 8 "x" 8. La tabla 3, muestra los resultados de esta última simulación, al utilizar los 2 algoritmos de reconstrucción BPDN y LASSO. Estas simulaciones fueron realizadas utilizando el diccionario 1, debido a que este presentó el mejor rendimiento en las simulaciones anteriores.

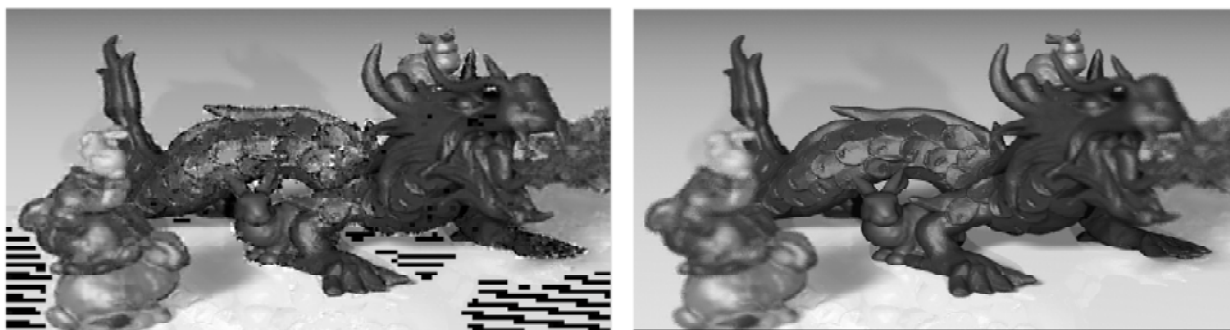


Figura. 3 Comparación de la reconstrucción con un parche de tamaño 8x8 (Izquierda) y un parche de tamaño 9x9 (Derecha). La mejora en el cambio del tamaño del parche o ventana es evidente visualmente.

TABLA III
COMPARACIÓN DE RESULTADOS CAMBIANDO EL
TAMAÑO DE LOS PARCHES UTILIZADOS

Imagen	Ventana o parche de 8x8		Ventana o parche de 9x9	
	LASSO	BPDN	LASSO	BPDN
Imagen 1	35,201	35,711	36,273	35,543
Imagen 2	40,781	47,294	36,279	47,481

IV. CONCLUSIONES

Mediante este trabajo se inicia el trabajo en el área del procesamiento de campos de luz. Se realizaron simulaciones con imágenes sintéticas en busca de analizar los diferentes componentes que intervienen en la reconstrucción de campos de luz. Las simulaciones realizadas permitieron analizar el comportamiento de diferentes algoritmos así como la influencia de las imágenes de entrenamiento, el tamaño de los parches utilizados y los diccionarios que se entrenan en las reconstrucciones obtenidas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gortler SJ, Grzeszczuk R, Szeliski R, Cohen MF. The lumigraph. Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '96 [Internet]. 1996. p. 43–54. Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=237170.237200>
2. Adelson E, Bergen J. The plenoptic function and the elements of early vision. Computational models of visual processing . [Internet]. 1991;3–20. Disponible en: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=6277403&abstractAccess=no&userType=inst
3. Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering. Proc 23rd Annu Conf Comput Graph Interact Tech - SIGGRAPH '96 [Internet]. 1996;31–42. Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=237170.237199>
4. Lippmann G. Epreuves reversibles, photographies integrales. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences [Internet]. 1908;444:446–51. Disponible en: http://jphystap.journaldephysique.org/articles/jphystap/abs/1908/01/jphystap_1908__7__821_0/jphystap_1908__7__821_0.html
5. Marwah K, Wetzstein G, Bando Y, Raskar R. Compressive light field photography using overcomplete dictionaries and optimized projections. ACM Trans Graph [Internet]. 2013;32:1. Disponible en: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2461912.2461914>
6. Chen SS, Donoho DL, Saunders MA. Atomic Decomposition by Basis Pursuit. SIAM Journal on Scientific Computing. 1998. p. 33–61.
7. Natarajan BK. Sparse Approximate Solutions to Linear Systems. SIAM Journal on Computing. 1995. p. 227–34.

COMPENSACIÓN DE LOS EFECTOS DISPERSIVOS DE LA FIBRA ÓPTICA EN UN SISTEMA IM-DD USANDO ECUALIZACIÓN LMS Y MLSE

OPTICAL FIBER IMPAIRMENTS COMPENSATION IN A IM-DD SYSTEM USING LMS AND MLSE EQUALIZATION

Roobert David Gallego Ruiz¹, Yeison David Sánchez Sierra¹, Jhon James Granada Torres¹,
Ana María Cárdenas Soto¹, Neil Guerrero González²

¹ Universidad de Antioquia, Colombia.

² Tyndall National Institute. Cork, Ireland.

Recibido: 3 Diciembre

Aceptado: 15 Diciembre

*Correspondencia del autor. Calle 70 No. 52-21, Of. 18-310 Medellín, Colombia. E-mail: jhon.granada@udea.edu.co

RESUMEN

Actualmente en Colombia ha comenzado el despliegue de la fibra óptica hasta el hogar, con el fin de que los operadores de telecomunicaciones ofrezcan servicios de mayor capacidad, aprovechando el gran ancho de banda que proporciona la fibra óptica. Para la masificación de esta tecnología y el cubrimiento de todos los usuarios finales, las redes deben ser de bajo costo, por lo cual los sistemas modulados en intensidad con detección directa (IM-DD) siguen vigentes a pesar de las ventajas de los receptores ópticos coherentes. No obstante, en los sistemas IM-DD, las señales transmitidas se ven más afectadas ante las imperfecciones de la fibra óptica como lo es la dispersión cromática, causante de la interferencia inter-símbolo, la cual provoca el aumento de la tasa de error de bit (BER). En este artículo se presenta una red óptica IM-DD simulada en Virtual Photonics®(VPI), para transmisión de señales con modulación No-Return-to-Zero On-Off-Keying (NRZ-OOK) de hasta 40 Gbps, con longitudes de fibra óptica monomodo estándar hasta de 80 km. Se plantea la compensación de los efectos del canal óptico mediante la ecualización eléctrica usando el algoritmo de LMS (Least-Mean-Square), estimando los coeficientes del canal a través de secuencias de entrenamiento, presentando una reducción significativa del BER a 10 Gbps con respecto a la relación señal a ruido (SNR). Además, se comparan los resultados con un ecualizador MLSE (Maximum-likelihood sequence estimation), el cual reduce en menor medida el BER en comparación a la ecualización LMS..

Palabras claves: Ecualización, Fibra óptica, LMS, MLSE, Tasa de Error de bit (BER).

ABSTRACT

Currently, Colombia has started the deployment of fiber-to-the-home (FTTH) technology. It is due to the traffic demand and the new services offered to the end users, taking advantage of the great optical fiber bandwidth. For FTTH massification, the equipments of optical networks must be of low cost, therefore, IM-DD (intensity modulation with direct detection) systems are still implemented in spite of the advantages of coherent detection systems. However, in IM-DD systems, the transmitted signals are not tolerable to the optical fiber impairments, mainly, the chromatic dispersion, which generates the inter-symbol interference (ISI) in the received signal, increasing the bit error rate (BER). In this paper, an IM-DD system is modeled in Virtual Photonics®(VPI) software. The optical network is modulated in No-Return-to-Zero On-Off-Keying (NRZ-OOK) format, at 40 Gbps, reaching distances of 80 km. Optical fiber impairments compensation is proposed using LMS (Least-Mean-Square) algorithm, which uses a training sequence to find the channel coefficients, and MLSE (Maximum-likelihood sequence estimation). These techniques allow a BER reduction and improve the system performance.

Keywords: Equalization, Optical Fiber, Least-Mean-Square (LMS), Maximum-likelihood sequence estimation (MLSE), Bit-error-rate (BER).

1-INTRODUCCIÓN

El avance en los sistemas de telecomunicaciones de alta capacidad se ha dado gracias a las transmisiones por fibra óptica en conjunto con el desarrollo de transmisores y receptores que operan a una tasa del orden de los Gbps. Pasando de una modulación directa del láser a usar moduladores externos de intensidad y fase, como el Mach-Zender (MZM) y el modulador de electro-absorción (EAM)(1). Los sistemas ópticos con modulación de Intensidad y Detección Directa (IM-DD) son ampliamente usados debido a que son de bajo costo y de fácil implementación(2), comparado con la tecnología de detección coherente, que permite mayor capacidad de transmisión(3), pero a cambio de un costo muy elevado para el despliegue actual en los terminales de usuario final(2).

La tecnología de fibra hasta el hogar (FTTH, fiber to-the-home) se ha desplegado en diferentes países, con la intención de ofrecer más capacidad a los usuarios finales en comparación con las tecnologías de cobre, evitando el cuello de botella generado en las interfaces que conectan a los medios de cobre como el cable coaxial(4). Las transmisiones se ven restringidas en distancia y velocidad de transmisión, debido a las imperfecciones propias de la fibra óptica, como la dispersión cromática (CD), la dispersión por modo de polarización (PMD), ruidos térmicos y ruidos generados por los dispositivos electro-ópticos, los cuales generan interferencia intersímbolo (ISI), cuyo efecto in-

fluye en el aumento de la tasa de error de bit (BER)5. La ISI puede ser compensada mediante diferentes técnicas ópticas y eléctricas que permiten reducir el BER. La dispersión cromática puede ser mitigada de manera pasiva al instalar fibras compensadoras de dispersión (DCF) cuya principal característica es su elevado parámetro de dispersión y de signo opuesto al de las fibras convencionales operando en tercera ventana6. Las técnicas eléctricas comúnmente usadas son los ecualizadores eléctrico, que por medio de algoritmos que modifican los coeficientes de filtros adaptativos de acuerdo al comportamiento de la señal recibida que se compara con una secuencia de entrenamiento o con estimaciones probabilísticas (ecualización ciega) (7).

Entre los ecualizadores más estudiados se encuentran los transversales como el ZF (Zero-Forcing) y el MMSE (Minimum Mean Square error), los ecualizadores fraccionados y otros de mayor complejidad como el DFE (Decision Feedback Equalizer), con estimación probabilística como el MLSE (Maximum likelihood sequence estimation) y de secuencias de entrenamiento como el LMS (Leans Means Square) (8,9,10).

El algoritmo adaptativo LMS se caracteriza por su fácil implementación, bajo gasto computacional y su efectividad en la modificación de los coeficientes adaptativos del ecualizador, minimizando las

imperfecciones que se presentan en la señal transmitida por la fibra(11); realiza la corrección de los desplazamientos aleatorios en la frecuencia de los sistemas QAM de orden superior(12), y en las nuevas modulaciones sin portadora tipo CAP (Carrierless amplitude/phase), a tasas de transmisión hasta de 40 Gbps, en 40 Km de fibra estándar monomodo(13). Además, se han mostrado resultados experimentales donde la ecualización LMS ha mitigado efectos no lineales en un sistema óptico multiportadora a velocidades en el rango de los Gbps(13).

Además del LMS, el algoritmo MLSE también es usado en aplicaciones ópticas. Este algoritmo realiza el cálculo del error mínimo aproximado en la señal transmitida mediante el algoritmo de Viterbi (VA), una técnica eficiente en el cálculo probabilístico de detección de señales afectadas por la CD y el ruido(14).

Los algoritmos LMS y MLSE continúan en constante investigación, optimizándolos en términos de eficiencia computacional para los futuros sistemas ópticos de gran capacidad(15). Entre los algoritmos LMS

modificados se encuentran el M-LMS7 y el DD-LMS(13) que alcanzan una mayor exactitud y una rápida convergencia.

En la sección II se presentará una red óptica IM-DD simulada en Virtual Photonics®(VPI), para transmisiones del orden de los Gbps, con longitudes de fibra óptica monomodo estándar de hasta 80 km, donde se compensan los efectos del canal óptico mediante la ecualización eléctrica usando el algoritmo LMS y MLSE. Se compara el rendimiento del sistema ecualizado mediante la medida de la magnitud vectorial de las señales muestreadas y las curvas de tasa de error de bit (BER) versus relación señal a ruido (SNR).

2- MONTAJE DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Las simulaciones de las transmisiones de la red óptica IM-DD desarrolladas en el software Virtual Photonics Inc® (VPI), para transmisión de señales con modulación en amplitud permiten evaluar el impacto de los efectos no deseados en las señales demoduladas. A continuación se muestra la configuración utilizada:

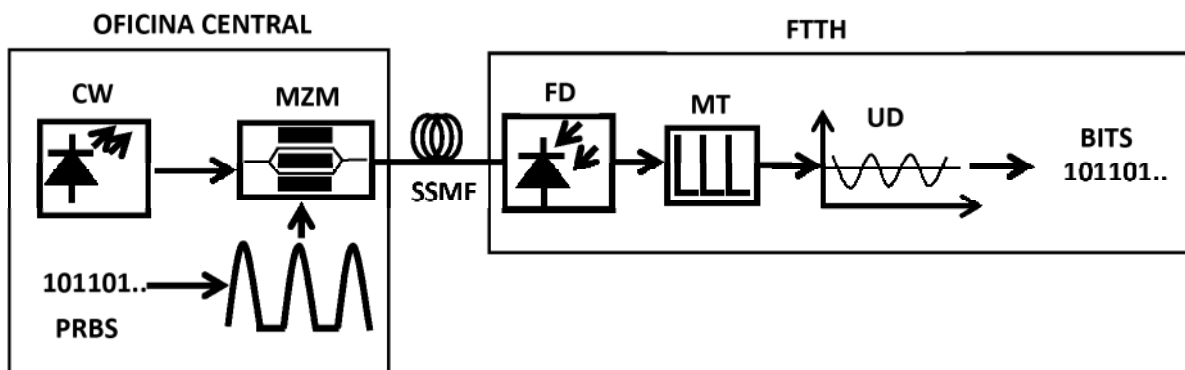


Figura. 1 Esquema del Sistema óptico. (PRBS: Secuencia de bits pseudo-aleatoria, CW: Fuente láser de onda continua, FP: Formación de pulsos, FD: Foto detector, ME: Modulador Externo SSMF: Fibra monomodo estándar, MT: Muestreador, UD: Umbral de decisión)

El transmisor consiste en una fuente láser de onda continua con un ancho de línea de 1 MHz en el rango de 1550 nm. La potencia óptica del láser es 1 dBm. La salida del láser está conectada a un modulador de intensidad externo con características ideales. Las secuencias de bits se encuentran moduladas digitalmente en el formato eléctrico NRZ-OOK a 10 y 40 Gbps.

El canal de transmisión es una fibra monomodo estándar con una longitud de hasta 80 Km, con una atenuación de 0.2 dB/Km y un factor de dispersión de 16 ps/nm.km. En el receptor las señales transmitidas son de-

tectadas por un fotodiodo de responsividad de 1 A/W. La señal eléctrica NRZ-OOK es muestreada, y por medio del umbral de decisión se obtiene la secuencia de bits.

ECUALIZACIÓN DEL CANAL

Se desea compensar los efectos del canal por medio de la ecualización adaptativa LMS y MLSE en el dominio eléctrico.

A- Modelo del canal

En ausencia de no linealidades, el efecto de la disper-

sión cromática, sobre la envolvente $A(z,t)$ de un pulso se puede representar con la ecuación parcial diferencial (1), siendo el factor más influyente en la fibra óptica para modulación NRZ-OOK.

$$\frac{2A(z,t)}{2z} = j \frac{D\lambda}{4\pi c} \frac{2A(z,t)}{2t^2} \quad (1)$$

Donde D es el coeficiente de dispersión de la fibra, z es la propagación, t es la variable del tiempo en una trama de movimiento del pulso, c es la velocidad de la luz λ es la longitud de onda(16).

B- Ecuación LMS

El LMS es un algoritmo iterativo que encuentra los coeficientes de un filtro adaptativo, mediante la minimización del error generado entre la diferencia de la señal transmitida y la señal recibida(16,17), definido por las siguientes expresiones:

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n-1)\mathbf{u}(n) \quad (2)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (3)$$

$$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + f(\mathbf{u}(n), e(n), \mu) \quad (4)$$

La ecuación de actualización de pesos está dada por:

$$f(\mathbf{u}(n), e(n), \mu) = \mu e(n) \mathbf{u}^*(n) \quad (5)$$

Dónde:

n : Posición actual en el tiempo.

$\mathbf{w}(n)$: Vector de los coeficientes del filtro en el tiempo.

$d(n)$: Secuencia de entrenamiento (señal deseada).

$y(n)$: Señal a la salida del ecualizador.

$\mathbf{u}(n)$: Señal recibida, que ingresa al ecualizador.

$\mathbf{u}^*(n)$: Conjugado de $\mathbf{u}(n)$.

e : Error estimado en el tiempo.

El LMS realiza un proceso iterativo según los parámetros de tamaño del filtro adaptativo y tamaño de paso. En la figura 2 se muestra la configuración del receptor. Se usó un filtro de orden 4 con un tamaño de paso de 0.06.

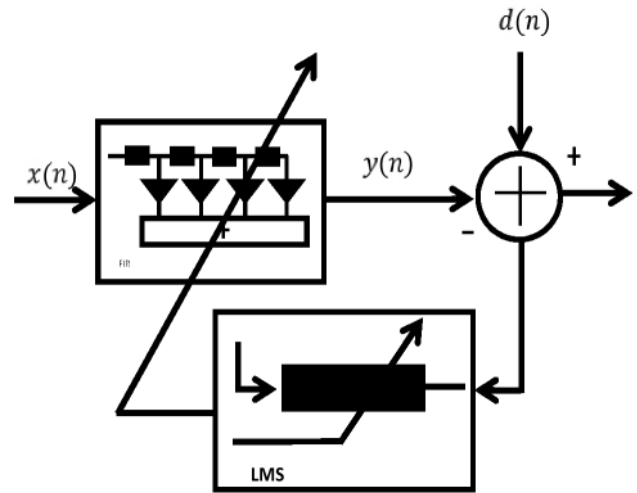


Figura. 2 Ecualización con LMS (MT: Muestreador, UD: Umbral de decisión)

C- Ecualización MLSE

El MLSE minimiza la probabilidad de error en la toma de las decisiones sobre la secuencia transmitida, detectando óptimamente la secuencia de entrenamiento(18-19). El receptor emula el canal distorsionado a través de los coeficientes estimados (Ver fig. 3) y calcula probabilísticamente los bits transmitidos, de acuerdo a los valores recibidos de la señal digitalizada.

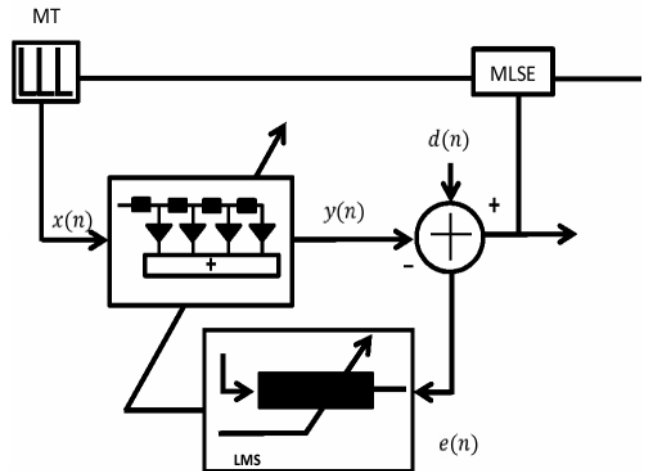


Figura. 3 Ecualización con MLSE

La base del método MLSE es el valor del parámetro que maximiza el valor de la función de probabilidad y esto se aplica a un sistema de transmisión, al suponerse que se recibe el vector de una señal $r = [r_0, r_1, \dots, r_{(N-1)}]$ considerando que representa una de las posibles secuencias transmitidas $[S_0, S_1, \dots, S_{(N-1)}]$ por lo tanto la secuencia más probable es:

$$s(r) = \arg_{s_t} \max f(r|s_t) \quad (6)$$

La secuencia más probable para ser transmitida es la asociada con la mínima distancia euclidiana entre la señal recibida y la posible secuencia transmitida S_t :

$$\Lambda = \prod_{k=0}^{N-1} m(x_k, x_{k+1}) \quad (7)$$

Estas consideraciones sugieren una formula recursiva de:

$$\Lambda(s_i)\Lambda(s_k)=\Lambda(s_{k+1})+\lambda(x_k, x_{k+1}) \quad (8)$$

Con $S_i = [S_0, S_1, \dots, S_{N-1}]$ ($S_{N-1} = S_t$) y $\Lambda(s_0) = 0$ Donde después de iteraciones se obtiene:

$$\Lambda(s_i) = \Lambda(s_{N-1}) \quad (9)$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La señal muestreada en el receptor, se muestra como una constelación con los puntos dispersos, cercanos al '0' y '1' lógico como se muestra en la figura 5. Se calcula el valor EVM (Error Vector Magnitude) definida como la raíz cuadrada media (RMS) entre un conjunto de símbolos medidos y símbolos ideales(20). En una modulación de amplitud se puede determinar de la siguiente manera:

$$EVM_{RMS} = \left(\frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |I_t - I_{o,t}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(I_{o,n})^2]} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Dónde:

T : Número de símbolos de la constelación medida.

N : Número de símbolos de la constelación ideal.

I_t : Voltaje normalizado de los símbolos recibidos.

$I_{o,i}$: Voltaje normalizado para los símbolos ideales transmitidos.

La figura 5a se muestra las curvas BER vs SNR para una transmisión a 10 Gbps. Aquí se compara la transmisión ecualizada y sin ecualizar. Usando ecualización LMS se logró una reducción del Log(BER) de -0.5 a -1.7 con SNR de 1dB. Además, se presenta una disminución del SNR aproximada de 16dB a 3dB para un Log(BER) de -2.1 a una distancia de 5 Km, mientras que para 80 Km se observó una disminución del log(BER) de ~ -0.4 a ~ -1 con una SNR de 1dB y una penalidad SNR de ~ 21 a ~ 15 con un log(BER) de -2.1. Lo anterior muestra que el LMS es más eficiente a distancias menores de 20 Km.

Los diagramas de constelación de la Figura 5 para una transmisión a 5 y a 80 km. A 80 km (fig. 5c), se miden un EVM de 44.31% sin ecualizar. Con ecualización LMS (fig. 5e) el EVM es del 30.90%, mostrando una reducción en la dispersión de la señal muestreada. Para el caso de 5 km, se midió un valor de EVM de 14.31% sin ecualizar (fig. 5b) y un 7.79% con LMS (fig. 5d), reduciendo aproximadamente a la mitad el valor porcentual de EVM.

En la figura 6 se muestran las curvas BER vs SNR comparando la señal sin ecualizar y con ecualización MLSE. Se puede notar que la ecualización MLSE muestra una menor reducción de log(BER) y de la penalidad de la SNR en comparación con el LMS. A una distancia de 5 km se observa una reducción aproximada del log(BER) de -1.1 a -1.6 con una SNR de 13dB. Además, se muestra una reducción en la penalidad de la SNR de 18dB a 14dB para un log(BER) de -1.8 a una distancia de 5 km. Para una transmisión de 20 Km se visualiza para una SNR de 13dB una reducción aproximada del log BER de -1.2 a -1.4, y una disminución en la penalidad de la SNR de 18dB a 16dB para un log(BER) de -1.8

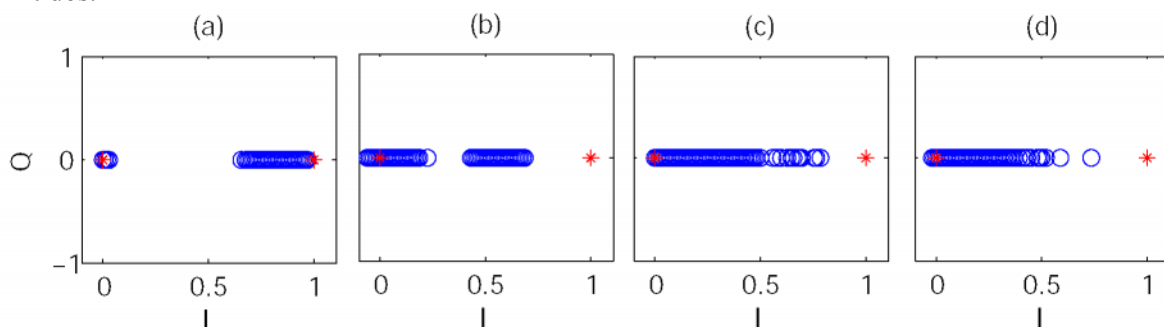


Figura. 4 Diagrama de constelación, sin ecualización. (a) Señal transmitida a 10 Gbps a una distancia de 20 Km (b) Señal transmitida a 10 Gbps a una distancia de 80 Km (c) Señal transmitida a 40 Gbps a una distancia de 20 Km (d) Señal transmitida a 40 Gbps a una distancia de 80 Km.

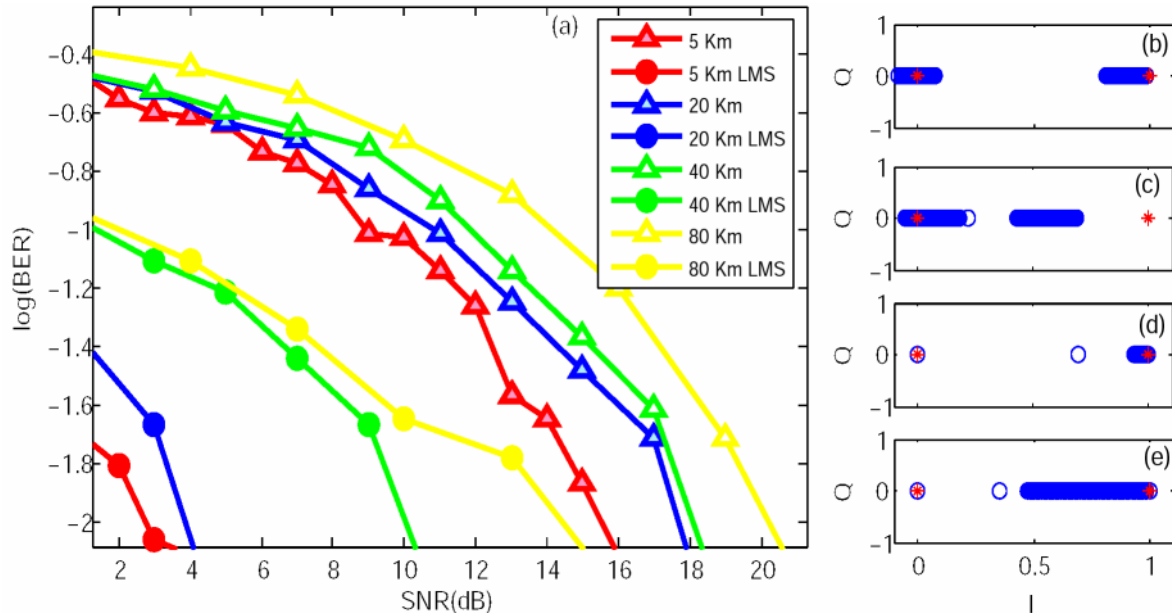


Figura.5 (a) Curvas BER vs SNR para una transmisión a 10 Gbps, con y sin ecualización. Diagrama de constelación para una transmisión a 10 Gbps (b) a una distancia de 5 Km sin ecualización (c) a una distancia de 80 Km sin ecualización (d) a una distancia de 5 Km con ecualización (e) a una distancia de 80 Km con ecualización.

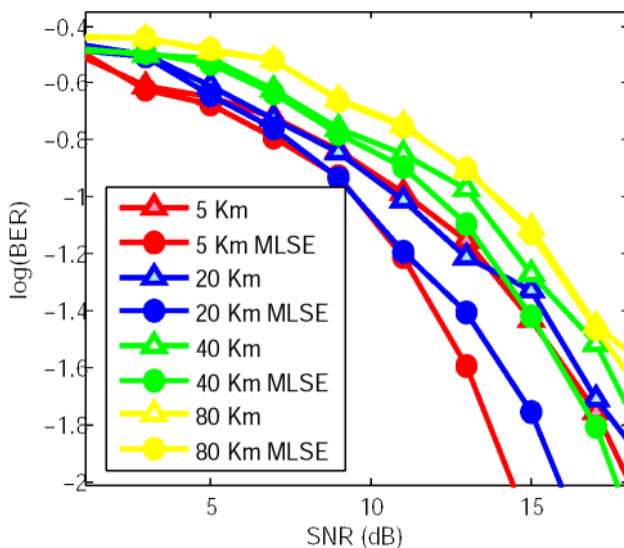


Figura. 6 Curvas BER vs SNR para una transmisión a 10 Gbps, con y sin ecualización.

La Figura 7a muestra las curvas BER vs SNR para transmisiones a 40 Gbps con y sin ecualización LMS. A una distancia de 5 Km el log(BER) se reduce de ~ 0.4 a ~ 1.5 con un SNR de 1dB gracias a la ecualización LMS. Así mismo, se reduce la penalidad del SNR en 17 dB con un log(BER) de -2.

En los diagramas de constelación de la figura 7 para la transmisión de 40 Gbps. Se obtiene un EVM de 46.36% sin ecualizar (fig. 7b) y un 12.79% ecualizado para distancia de 5 Km (fig. 7c). Para distancia de 80 km el EVM tiene un valor de 85.07% sin ecualizar y de 60.91% con ecualización LMS. Lo anterior muestra que para distancia de 5 Km, el LMS disminuye en más de una tercera parte su valor porcentual de EVM. Para una distancia de 80 Km el valor porcentual EVM es superior al 50% incluso con ecualización.

En la Figura 8 se muestran las curvas BER vs SNR para una transmisión a 40 Gbps con y sin ecualización MLSE. Las curvas sin ecualización muestran una transmisión con log(BER) mayor a -0.6, lo que explica una transmisión de información no recuperable. Con ecualización MLSE hubo una disminución de aproximadamente 1dB en la penalidad de la SNR para 5 km. Sin embargo, el comportamiento es muy similar entre la señal ecualizada y sin ecualizar, lo que demuestra que la ecualización MLSE no es eficiente a esta velocidad de transmisión debido a que no hubo una reducción significativa de la BER.

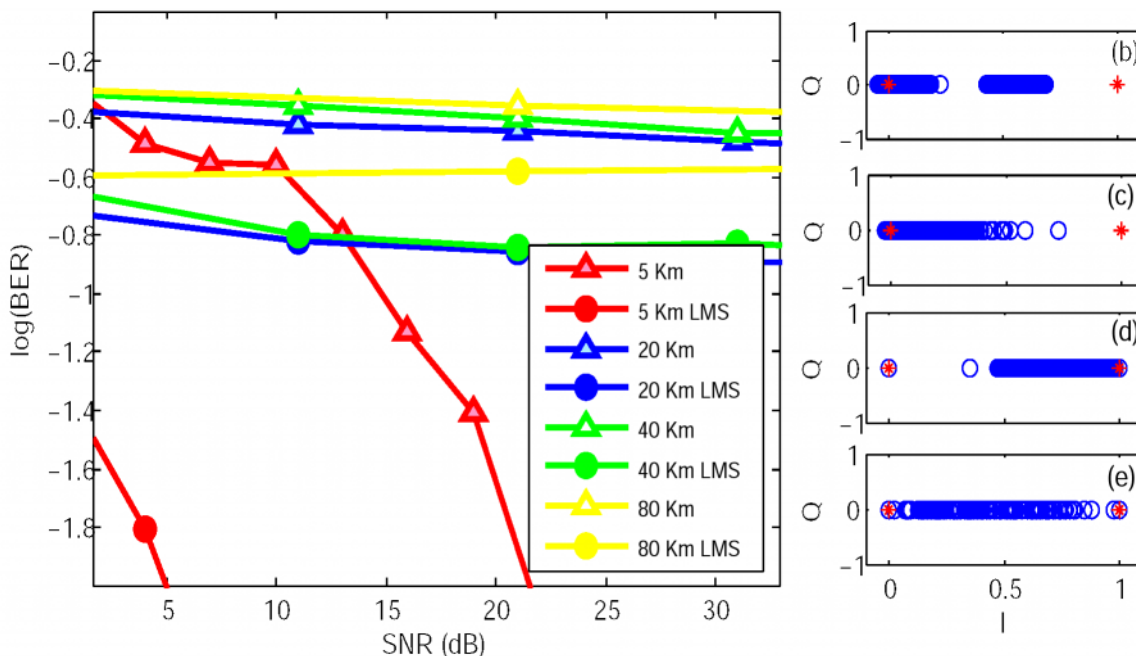


Figura 7 (a) Curvas BER vs SNR para una transmisión a 40 Gbps, con y sin ecualización. Diagrama de constelación para una transmisión a 40 Gbps (b) a una distancia de 5 Km sin ecualización (c) a una distancia de 80 Km sin ecualización (d) a una distancia de 5 Km con ecualización (e) a una distancia de 80 Km con ecualización

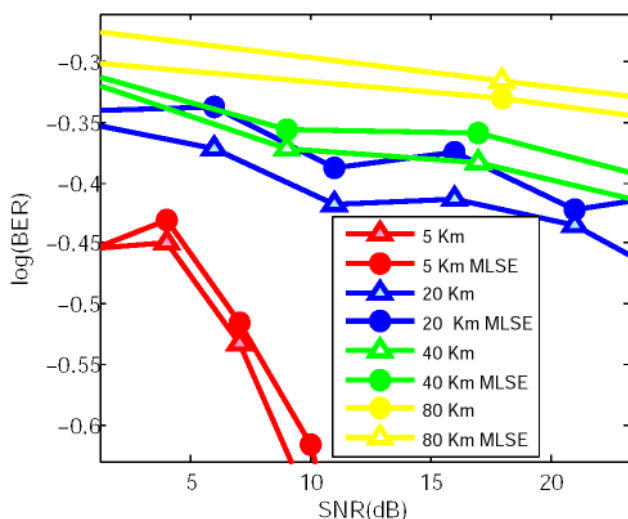


Figura. 8 Curvas BER vs SNR para una transmisión a 40 Gbps, con y sin ecualización.

CONCLUSIONES

Se analizó un sistema IM-DD con modulación NRZ-OOK hasta los 40 Gbps. A esta tasa de transmisión la información de la señal no puede ser recuperada sin usar métodos de ecualización. Con el algoritmo de LMS, se pudo lograr una disminución significativa en la penalidad de la SNR para distancias menores a los 5 km. Además, la ecualización LMS reduce de manera eficiente el BER a velocidades de 10 Gbps hasta los 80 km. El algoritmo de MLSE no fue eficiente en la reducción de la BER para los casos transmitidos, mostrando sólo resultados relevantes a transmisión de 10 Gbps con distancias menores a los 20 km. Además, el gasto computacional del algoritmo MLSE es mayor que el del LMS.

BIBLIOGRAFÍA

1. Deming K, Hui W, Yan L, Jizhao Z, Siyuan Z, Xixue J, et al. Ultra-low timing-jitter 40 Ghz clock recovery using EAM-MZM double-loop and its application in a 640 Gbit/s OTDM system. In Optical Communications (ECOC), 2012 38th European conference exhibition; 2012.
2. España Bosquera M. Fotodetectores y receptores para comunicaciones ópticas. J Bravo, Ediciones Díaz de Santos S.A. 2005.
3. Alzate D, Cardenas A. Retos en la transmisión de 40/100 Gb/s sobre fibra óptica. Revista en telecomunicaciones e informatica. 2011; 1(2).
4. Tinoco J. Estudio y diseño de una red de fibra óptica FTTH para brindar servicio de voz, video y datos para la urbanización los olivos ubicada en el sector toctesol en la parroquia borrero de la ciudad de azogues. 2011. Tesis de Grado, Dep. Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana.
5. Yu L, Peijian J, Jianming L, Li L, Xueheceng Z, Zhan P, et al. A fast fourier transform-based channel estimation algorithm for MLSE equalization in optical system. In Wireless communications, networking and mobile computing (WICOM); 2011. p. 23-25.
6. Hai-Han L. Performance comparison between DCF and RDF dispersion compensation in fiber optical CATV systems. IEEE Transactions. 2002 Dec; 48(4).
7. Dorini L, Leite N. A general self-dual adaptative filtering toggle operator. In Computer graphics and image processing, 2008. SIBGRAPI '08. XXI Brazilian symposium; 2008. p. 189,195,12-15.
8. Mendieta D, Milocco R. Ecualización adaptativa de canales utilizando blanqueo y ajuste de fase. Rev. Arg. de trab. estudiantiles. 2006 Febrero; 1(1).
9. Yi J, Varanasi M, Jian L. Performance analysis of ZF and MMSE equalizers for MIMO systems: An In-Depth study of the high SNR regime. IEEE Transactions. 2011 April; 57(4).
10. Chih-Hao L, Vaidyanathan p. MIMO broadcast DFE transceivers with QoS constraints: min-power and max-rate solutions. IEEE Transactions. 2013 Noviembre; 61(22).
11. Gorshtein A. Symbol spaced adaptive MIMO equalization for ultrahigh bit rate metro coherent optical links. In IEEE; 2013. p. 414-417.
12. Mori Y. Dual-stage decision-directed phase estimator enabling perfect frequency-offset elimination in digital coherent receivers. In IEEE; 2013. p. 1-3.
13. Li T, Yiguang W, Yuliang G, Lau , Nan C, Chao L. 40 Gb/s CAP32 system with DD-LMS equalizer for short reach optical transmissions. In IEEE; 2013. p. 2346-2349.
14. Simulación de la interfaz de radio para sistemas de comunicaciones móviles GSM/GPRS. Escuela de ingeniería electrónica y electrónica, Universidad del Valle.
15. Avalos JF. Algoritmo LMS con error codificado usando un DSP. 2008. Tesis de maestría, Instituto politécnico nacional, Mexico D.F.
16. Granada JJ, Zuluaga CE, Guerrero N, Díaz OM. Compensación de la dispersión cromática usando ecualización LMS. In Symp. de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial; 2010; Bogotá. p. 224-229.
17. Poularikas AD, Ramadan ZM. Adaptive Filtering primer with MATLAB. 2006. Taylor & Francis Group.
18. Roffé E. Uso de los receptores MLSE en las comunicaciones ópticas. 2008. Tesis de pregrado, Universidad central de Venezuela.
19. Binh LN, Huynh TL, Pang KK, Sivahumaran T. MLSE equalizers for frequency discrimination receiver of MSK optical transmission system. Lightwave technology. 2008 June; 26(12).
20. Shafik RA, Rahman S, Islam R. On the extended relationships among EVM, BER and SNR as performance metrics. In International Conference Electrical and Computer Engineering (ICECE); 2008. p. 408,411,19-21.

ASISTENTE DOMÓTICO A DISTANCIA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE RECONOCIMIENTO DE VOZ

WIRELESS DOMOTIC ASSISTANT USING SPEECH RECOGNITION TECHNIQUES

Jairo A. Vélez Pérez¹, José D. Bejarano Berrio², Carlos E. Arrieta Monsalve³, Edilson Delgado Trejos⁴

-
- ¹. Egresado Ingeniería Electrónica, Semillero MIRP - AEyCC. Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano –ITM Campus Fraternidad, Calle 54A No. 1-30, Medellín, Colombia. E-mail: jairovelez121149@correo.itm.edu.co
 - ². Egresado Ingeniería Electrónica, Semillero MIRP - AEyCC. Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano –ITM Campus Fraternidad, Calle 54A No. 1-30, Medellín, Colombia. E-mail: josebejarano120018@correo.itm.edu.co
 - ³. Estudiante Semillero MIRP - AEyCC. Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano ITM Campus Fraternidad, Calle 54A No. 1-30, Medellín, Colombia. E-mail: josebejarano120018@correo.itm.edu.co
 - ⁴. Investigador Sénior, Grupo de Investigación en Calidad, Metrología y Producción. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Instituto Tecnológico Metropolitano–ITM, Campus Robledo, Calle 73 No 76A - 354, Medellín, Colombia Email: edilsondelgado@itm.edu.co
-

Recibido: 3 Diciembre

Aceptado: 15 Diciembre

*Correspondencia del autor. Instituto Tecnológico Metropolitano –ITM Campus Robledo, Calle 73 No 76A - 354, Medellín, Colombia
Email: edilsondelgado@itm.edu.co

RESUMEN

Este trabajo presenta una propuesta metodológica de bajo costo y con alto margen de novedad para aplicaciones domóticas. Consiste en la vinculación de un ordenador dotado de un sistema de reconocimiento de voz, una placa de desarrollo Arduino Uno r3 y dispositivos electrónicos de uso común en los montajes electrónicos. El sistema permite realizar de forma automática tareas comunes en una vivienda, a fin de proporcionar un mayor comfort al usuario y prestar asistencia a las personas con algún tipo de discapacidad física, mediante la interacción con el sistema usando comandos de voz. Entre las prestaciones actuales del sistema, están el control de velocidades de ventiladores, control on-off de bombillas, programación de alarmas, monitoreo del estado del sistema (batería, procesador, temperatura y voltaje), control de un televisor, entre otras. El sistema está soportado bajo lenguajes como C# y C++. El reconocimiento de voz se basa en la librería Windows Speech, y el código fuente es ejecutado en entornos de desarrollo integrado (IDE) como Visual Studio 2013 y Arduino IDE, además el sistema incluye un sintetizador de voz SAPI6 para realizar la interacción con el usuario, y para mayor transportabilidad del sistema se incluyen las bondades de la comunicación inalámbrica por medio de módulos de radiofrecuencia (RF). La interacción entre el sistema y el usuario se logró en tiempo real, mejorando los resultados obtenidos con otros sistemas basados en la conexión a Internet que induce retardos no deseados.

Palabras claves: Domótica, red inalámbrica, instrumentación electrónica, comando de voz, reconocimiento de voz.

ABSTRACT

A low cost methodology with novel components in domotic applications is presented in this paper. We propose to integrate a speech recognition system in a computer with an Arduino Uno r3 type development system and several common use electronic devices. The integrated system allows different routine home duties to be performed automatically, with the aim of offering increased comfort to users and assisting disabled people who use voice commands. Among several system services, it is important to highlight the speed control of fans, on-off control of lights, alarm schedule, state monitoring of the system (battery, processor, temperature and voltage) and television control. The proposed system is supported by C# and C++ languages. Speech recognition uses the Windows Speech library, and the source code is executed on Integrated Development Environment (IDE) as Visual Studio 2013 and Arduino IDE. Furthermore, the system includes a SAPI6 speech synthesizer for interaction with the user, and for improved system transportation, with the benefits of wireless communication through a radio frequency (RF) module. The interaction between system and user was tested in real-time, improving the achievements with another system based on Internet connection, which induces non desired delays.

Keywords: Domotics, wireless network, electronic instrumentation, voice command, speech recognition.

I. INTRODUCCIÓN

Algunas definiciones de domótica encontradas en la literatura, la relacionan con la automatización del hogar haciendo uso de la tecnología de medios electrónicos con el fin de mejorar la calidad de vida de sus ocupantes (1). En (2), se destaca el uso de las tecnologías de la información y la comunicación para realizar el proceso de automatización de viviendas, mencionando los protocolos de comunicación inalámbrica Bluetooth y Zigbee como uno de los más usados. Las características de un sistema domótico incluyen principalmente el uso de dispositivos electrónicos y sistemas informáticos como la telefonía y el internet, facilitando la interacción, manejo a distancia y capacidad de programación. Actualmente, la domótica es un campo que ha ganado mucha fuerza en el control de los aparatos eléctricos del hogar y permite al usuario realizar tareas de automatización usando sistemas de reconocimientos de voz. Un sistema de reconocimiento de voz permite al computador identificar y entender palabras habladas por una persona usando un micrófono o un teléfono (3). Esto significa que un usuario puede hablar con el PC usando un conjunto de comandos e instrucciones pre-programadas y el PC responderá de la misma manera.

Desde 1975 con la aparición del estándar industrial X10 para la comunicación de dispositivos electróni-

cos, la cual fue llevada a la vivienda para la interacción automática entre sensores, actuadores y demás dispositivos, permitieron concebir la domótica como un campo de investigación y desarrollo (1). Investigaciones recientes usan diferentes técnicas y lenguajes de programación para conseguir la interacción del usuario con la vivienda. Por ejemplo, el sistema puede basarse en la interacción de un PC cliente controlado por el usuario y un PC servidor donde se aloja un sistema de reconocimiento de voz basado en las librerías de Microsoft Speech (SAPI), el cual permite traducir las peticiones del usuario en un dato simbólico para ser posteriormente procesado por el PC cliente a fin de efectuar la acción solicitada (2). El problema de este trabajo radica en que la configuración de la voz del usuario se debe realizar escogiendo entre tres tipos de voces con tonos, por ende el sistema sólo puede ser usado por quien lo configura, además que el procesamiento por ser remoto tiene retardos en la comunicación, debido a las condiciones climáticas y la cobertura a Internet que se posea. Una limitación frecuente en este tipo de trabajos, es que está sujeto a librerías de Microsoft Windows y por ende el sistema sólo podría ejecutarse en computadores con este sistema operativo. En (4), se soluciona el problema de compatibilidad de plataformas usando librerías de Java para el procesamiento de voz, consiguiendo con ello compatibilidad en los distintos sistemas operativos.

Sin embargo, el problema hallado de este trabajo es la elevada capacidad de cómputo que se necesita para realizar el procesamiento, trayendo consigo un aumento en la instalación, dada la compra de equipos de cómputo de alta gama. Para solucionar la dependencia de Internet. En (5), se utilizan módulos Bluetooth para la comunicación entre los distintos dispositivos que componen la red, donde cada aparato posee submódulos Bluetooth que son controlados por un módulo principal y este es accionado por el usuario. El problema es que al ser necesarios tantos módulos Bluetooth como dispositivos a controlar, y dado que todos funcionan en la misma banda de frecuencia, la comunicación presenta retardos considerables. En (6), se presenta un sistema de automatización remoto usando un teléfono que no depende de Internet para su uso, pero tiene la principal desventaja que no posee una interfaz de usuario, además de tener que digitar códigos en el teléfono para poder realizar las tareas de automatización, siendo esto un limitante adicional para su uso cuando el usuario posee alguna discapacidad física. En (7), se usan módulos de comunicación inalámbrica del estándar Zigbee para el envío de datos, y una tarjeta de control embebida SUNPLUS SPCE061A para el reconocimiento de voz. Aunque con esto se logra una interacción entre el usuario y el software sin el uso de internet, presenta limitaciones en cuanto a la cantidad de palabras que se pueden usar para el reconocimiento de voz, contando con la poca capacidad de memoria de la tarjeta, además de que la interacción involucra 4 etapas para realizar una acción determinada, incrementando tiempos de procesamiento del sistema.

En este trabajo se presenta un sistema de control domótico por medio de comandos de voz usando técnicas inalámbricas basadas en transmisión de radiofrecuencias para realizar las tareas de automatización básicas de una vivienda, además de que el procesamiento puede realizarse de manera local, permitiendo una capacidad de comunicación en tiempo real entre el sistema de reconocimiento de voz y los módulos de comunicación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen los materiales usados para la integración del sistema y los preliminares teóricos así como también el método principal abordado para la conformación del sistema general.

II-A. Insumos del Proyecto

El sistema consiste en una colección de dispositivos electrónicos que en conjunto permiten realizar una aplicación de control de aparatos electrónicos a través de comandos de voz. Los insumos que intervienen en el proyecto son:

- Un computador portátil con sistema operativo Windows.
- Una placa de desarrollo Arduino Uno r3.
- Módulos RF a 433MHz .
- LEDs infrarrojo.
- Tarjetas de relés.

II-B. Preliminares Teóricos

1) Domótica: En términos generales, la domótica es la tecnología para desarrollar e implementar la automatización de instalaciones en casas o edificios. Los principales objetivos de la domótica son, seguridad, ahorro de energía, comfort y las comunicaciones (8).

2) Redes inalámbricas: Los estándares de comunicación inalámbrica de frecuente uso en domótica son ZigBee, Radio Frecuencia, Infrarrojo, Wifi u otros. A continuación, algunas definiciones comunes:

ZigBee: Estándar diseñado por la Zigbee Alliance, el cual es un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquier fabricante. ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN) y tiene como objetivo las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías (9).

Infrarrojo: El uso de mandos a distancia basados en transmisión por infrarrojos está ampliamente expandido en el mercado residencial para controlar a distancia equipos de audio y vídeo. Los controladores de equipos domésticos basados en la transmisión de ondas en la banda de los infrarrojos tienen las ventajas de comodidad, flexibilidad y admisión de un gran número de aplicaciones (10).

Radio frecuencia: Este medio de transmisión puede parecer, en principio, idóneo para el control a distancia de los sistemas domóticos, dada la gran flexibilidad que supone su uso. Sin embargo, resulta particularmente sensible a las perturbaciones electromagnéticas producidas tanto por los medios de transmisión como por los equipos domésticos (10).

II-C. Procedimiento Propuesto

1) Establecimiento del Diccionario de Referencia:

Para que el software tenga la capacidad de reconocer las palabras habladas, es necesario predefinir un diccionario de palabras que servirán como comandos de activación para las distintas tareas. El diccionario permite tantas palabras como se requieran. La estructura de un comando por comodidad siempre es iniciada con el nombre del software y es seguida de la orden que se desea. Por ejemplo, para encender una luz basta decir: Charvis enciende la luz x, donde x es el número de luz o el lugar donde se encuentra.

2) Conformación del Sistema: En la Figura 1 se ilustra el procedimiento que se propone para el asistente domótico. El sistema consiste en la vinculación de un ordenador dotado de un sistema de reconocimiento de voz, una placa de desarrollo Arduino Uno r3 y dispositivos electrónicos de uso común en los montajes electrónicos.

El sistema permite realizar de forma automática tareas comunes en una vivienda, a fin de proporcionar un mayor confort al usuario y prestar asistencia a las personas con algún tipo de discapacidad física, mediante la interacción con el sistema usando comandos de voz. Está soportado bajo lenguajes como C# y C++. El reconocimiento de voz se basa en la librería Windows Speech, y el código fuente es ejecutado en entornos de desarrollo integrado (IDE) como Visual Studio 2013 y Arduino IDE. Este sistema incluye un sintetizador de voz SAPI6 para realizar la interacción con el usuario, y para mayor trasportabilidad del sistema se incluyen las bondades de la comunicación inalámbrica por medio de módulos de radiofrecuencia (RF). La distribución física de los elementos finales de control, ilustrados

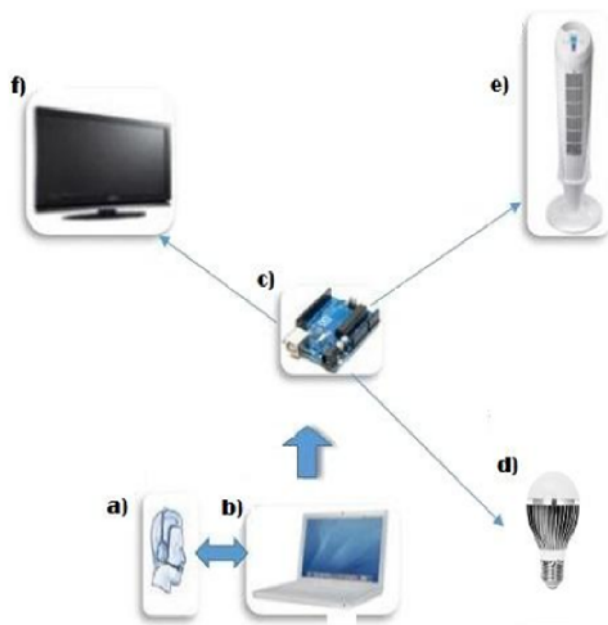


Figura 1: Bloques que conforman el sistema.

en la Figura 1 d), e) y f), respecto al medio de comunicación se representan por la topología estrella, debido a que todos los elementos finales están unidos entre sí, a través del controlador principal visto en la Figura 1 c). La arquitectura del sistema es del tipo centralizada ya que todos los elementos están conectados al sistema de control como se muestra en la Figura 1 b). El sistema responde de la siguiente forma: El usuario representado en la Figura 1 a), debe hablar para realizar una petición particular, y la voz es captada por el micrófono del computador y procesada por los algoritmos de programación. Luego, la petición se coteja con las pre-establecidas en el diccionario de referencia, y si corresponde con un comando válido, se realiza la comunicación con la placa Arduino, así como el módulo de radiofrecuencias que se encarga de enviar la orden a otro microcontrolador que ejecuta la acción. Si es para el control del televisor, el microcontrolador envía los datos por infrarrojo al receptor del televisor. Si es el ventilador o el foco de iluminación, el microcontrolador respectivo activa una tarjeta de relevos para encender o apagar las luces, o para cambiar las velocidades del ventilador. El montaje del sistema se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Montaje real del sistema.

III. RESULTADOS

Para medir la precisión del sistema de reconocimiento de voz y la velocidad en la ejecución de un comando

específico, se realizó la siguiente prueba: Tres personas repitieron 10 veces un mismo comando y se midió el tiempo en milisegundos que el software tarda en dar respuesta a la petición. Por otra parte, la precisión fue medida teniendo en cuenta la cantidad de veces que el sistema era capaz de reconocer un mismo comando. En la Tabla I, se consignan los datos tomados para dos comandos, de donde la línea horizontal (—) representa que el comando no fue procesado. El resumen de tiempos de otros comandos es ilustrado en la Figura 3a y 3b. En esta figura se evidencia que los comandos de mayor duración son los que requieren una respuesta hablada de alta duración, caso contrario a los comandos que no dan respuesta hablada y ejecutan la acción de manera inmediata. Los resultados demuestran el buen desempeño del asistente domótico a distancia usando el esquema de implementación propuesto.

Tabla I: Tiempo de respuesta de un comando.

Charvis enciende la luz 1			Charvis enciende el televisor		
1235	1303	1190	1282	1406	1311
1201	1317	1188	1020	-	1296
1191	1321	1211	1739	1189	1016
1193	1175	1321	1222	1712	-
1252	1182	1348	998	1213	992
1320	1309	1303	1007	1014	1254
1196	1228	1347	1217	1255	1292
1342	1197	1347	1200	1714	1193
1314	1178	1325	-	1230	1301
1190	-	1296	1713	1716	1194
Promedio		1259,31	Promedio		1285,04
% precisión		96,6	% precisión		90

IV. CONCLUSIÓN

Como resultado del ejercicio técnico-experimental expuesto en este artículo, se logró la implementación de un asistente domótico a distancia a través de la aplicación de técnicas de reconocimiento de voz, usando librerías de Windows Speech, entornos de desarrollo integrado (IDE) como Visual Studio 2013 y Arduino IDE. Todos los algoritmos fueron desarrollados bajo lenguajes C# y C++, además de incluir las bondades que ofrecen las redes inalámbricas mediante módulos de radiofrecuencia. El sistema implementado cuenta con la fortaleza de ser fácilmente transportable, además de una rápida reacción a los comandos y poca

sensibilidad a las interferencias. Aunque el sistema presenta inmunidad a las perturbaciones acústicas, si en el ambiente hay altos decibelios de ruido, el sistema puede interpretar erróneamente los comandos. En todo caso, el sistema presenta mejoras en su rendimiento cuando los niveles de ruido acústico pueden llevarse a condiciones controladas. Como trabajo futuro, se propone robustecer el diccionario de referencia con el fin de lograr que los comandos puedan ser exitosamente ejecutados, a pesar de que no se digan de una forma estricta. En este sentido, se puede conformar un libro de códigos de actualización inteligente, operando técnicas basadas en sistemas expertos e inteligencia artificial, y optimizando las búsquedas mediante técnicas evolutivas.

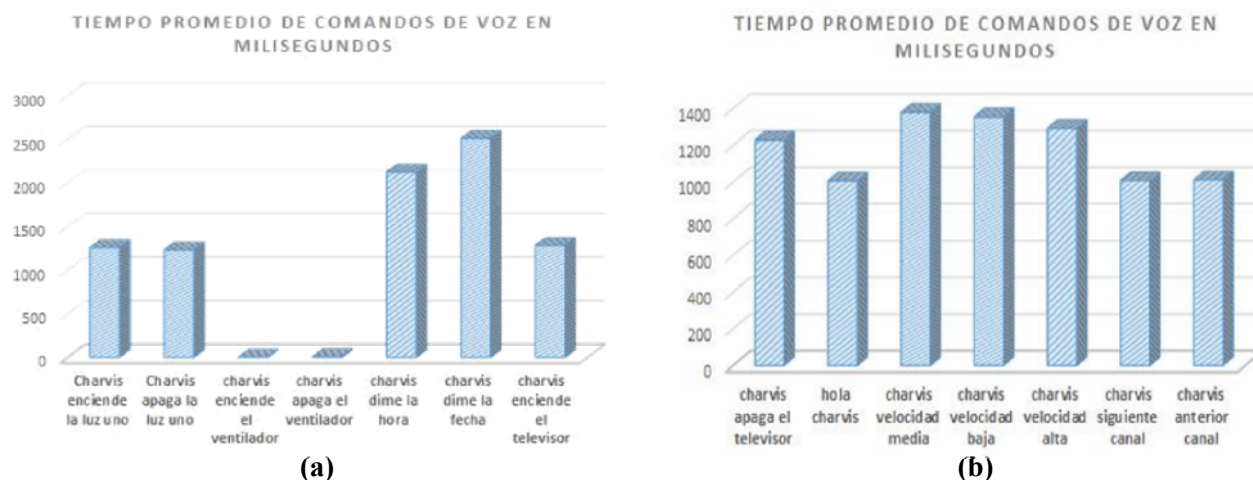


Figura 3: Diagrama de barras para algunos comandos.

BIBLIOGRAFÍA

1. K. Gill, S. H. Yang, F. Yao, and X. Lu, "A zigbee-based home automation system," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 55, pp. 422–430, May 2009.
2. S. Jain, A. Vaibhav, and L. Goyal, "Raspberry pi based interactive home automation system." pp. 277–280, Feb. 2014.
3. B. Mardiana et al., "Homes appliances controlled using speech recognition in wireless network environment," in *Computer Technology and Development*, vol. 2, Nov. 2009, pp. 285–288.
4. A. AL-Ali and M. Al-Rousan, "Java-based home automation system," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 2, pp. 498–504, 2004.
5. N. Sriskanthan, F. Tan, and A. Karande, "Bluetooth based home automation system," in *Microprocessors and Microsystems*, vol. 26, no. 6, 2002, pp. 281–289.
6. H. Ardam and I. Coakun, "A remote controller for home and office appliances by telephone," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 44, no. 4, pp. 1291–1297.
7. J. Guo et al., "interactive home-controlled applied to home automation," in *Intelligent information Hiding and Multimedia Signal Processing*, Sep. 2009, pp. 828–831.
8. F. Mateos et al., "Design and development of an automatic small-scale house for teaching domotics," in *Frontiers in Education Conference*, vol. 1, 2001, pp. T3C–1.
9. G. D. Goez, A. D. Torres, and E. Delgado, "Estructura de comunicación para el monitoreo y control de un robot geo-posicionado," Master's thesis, Instituto Tecnológico Metropolitano, aug 2011.
10. C. Romero, J. Vasquez, and C. DeCastro, *Domótica e inmótica. Viviendas y edificios inteligentes*, 2nd ed., RA-Ma, Ed., 2006.

DETECCIÓN DE CAMBIOS NO SUPERVISADA DE IMÁGENES SAR PARA EL SEGUIMIENTO DEL COMPORTAMIENTO Y ANÁLISIS DE INUNDACIONES EN COLOMBIA

DETECTION OF UNSUPERVISED SAR IMAGES CHANGES FOR THE MONITORING OF THE BEHAVIOR AND ANALYSIS OF FLOODS IN COLOMBIA

Jonathan Avendaño P.¹, Jorge I. Padilla¹, Jhon E. Vera¹, Jaime A. Parra²

¹ Grupo de Investigación INDETECA, Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales. Colombia

² Universidad de los Andes. Colombia

Recibido: 3 Diciembre

Aceptado: 15 Diciembre

*Correspondencia del autor. Grupo de Investigación INDETECA, Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales. Colombia

RESUMEN

Este trabajo propone un método no supervisado de detección cambios para el estudio del comportamiento de las inundaciones en Colombia usando imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar). El enfoque de detección de cambios propuesto es un método *pre-Clasificación*, en el cual se clasifican primero las imágenes y luego por medio de operadores de relación se encuentra los cambios. En primera instancia se filtraron las imágenes SAR con el filtro Frost-Mejorado con el objetivo de eliminar el efecto del ruido *Speckle*. Para la segmentación no supervisada de imágenes SAR se utilizaron los enfoques de *Fuzzy-Clustering* (FCM) y *k-means*, los resultados de ambos enfoques fueron fusionados con el fin de mejorar la precisión en la segmentación usando el método de fusión de imágenes PCA (*Principal Component Analysis*). Para la detección de cambios se implementaron los operadores de relación *Mean-Ratio* y *Log-Ratio*, los resultados de ambos operadores de relación también fueron fusionados usando PCA con el fin de mejorar la precisión en esta fase del método propuesto. Para la experimentación se usaron en primera instancia imágenes sintéticas creadas a partir de zonas homogéneas de imágenes SAR de Colombia. Con estas imágenes fue posible evaluar el desempeño del método propuesto. Los resultados mostraron una precisión total alrededor del 99 %, lo que concluye que el método propuesto es altamente eficiente sobre el conjunto de datos usado. Luego se experimentó sobre dos imágenes SAR reales, una antes y otra después de una inundación, las cuales fueron proporcionadas por el IDEAM y cubren el área del Magdalena bajo en el municipio del Plato-Magdalena. El método propuesto encontró que en estas imágenes aproximadamente 77.46 hectáreas del municipio del Plato-Magdalena fueron inundadas por el río Magdalena.

Palabras claves: SAR, Segmentación, Detección de cambios, imágenes de zonas de inundación.

ABSTRACT

This paper proposes an unsupervised method of detecting changes for studying the behavior of the floods in Colombia using images SAR (Synthetic Aperture Radar). The proposed change detection approach is a pre-classification method, in which first images are classified and then changes are found through relational operators. First, SAR images were filtered with filter-Enhanced Frost in order to eliminate the effect of Speckle noise. For unsupervised segmentation of SAR images, the Fuzzy Clustering (FCM) approach and k-means were used. The results from both approaches were fused in order to improve accuracy in segmentation using the method of image fusion PCA (principal Component Analysis). For the detection of changes, operators ratio Mean-Log-Ratio Ratio were implemented, the results of both relational operators were also fused using PCA in order to improve accuracy in this phase of the proposed method. For the experiment, first, synthetic images created from homogeneous areas of SAR images of Colombia were used. With these images, it was possible to evaluate the performance of the proposed method. The results showed an overall accuracy about 99%, which concludes that the proposed method is highly efficient on the data set used. Then, two real SAR images were experimented, one before and one after a flood, which were provided by the IDEAM and cover the area of Magdalena in the Plato-Magdalena. The proposed method found in these images about 77.46 hectares in the municipality of Magdalena plate were flooded by the Magdalena River.

Keywords: SAR Segmentation, detection of changes, images floodplain.

1. Introducción

En Colombia debido a su ubicación geográfica las inundaciones son muy comunes. Estas inundaciones traen consigo pérdidas humanas y económicas que afectan directamente los intereses del país. Casi todo el territorio nacional en épocas de lluvia se ve afectado por este fenómeno, pero sin duda alguna las zonas más afectadas son aquellas que se encuentran cercanas a los ríos, lagunas, embalses, ciénagas etc. La zona conocida como el magdalena bajo es la más afectada en épocas de lluvia. En varios años las inundaciones en esta parte del territorio Colombiano han costado la vida de muchas personas y han afectado la agricultura y la ganadería, principales fuentes económicas en este territorio. Las inundaciones son un proceso el cual es muy rápido en su fase de inundación pero muy lento a la hora de retirarse el agua del territorio inundado.

Durante varios años se ha evidenciado el uso de los datos multi-temporales para el seguimiento de las inundaciones y diferentes fenómenos naturales, tal es el caso del trabajo realizado en 2010 por Xu *et al.* (1) donde se mostró la efectividad de fusionar imágenes multi-temporales SAR polarimétricas con imágenes

ópticas de alta resolución como las que provee el sensor QuickBird, en su trabajo los autores demostraron que la fusión de estos datos mejora notablemente la clasificación de coberturas de tierra y el efecto del ruido *Speckle* sobre las imágenes SAR. Por otro lado en agosto de 2011, Pulvirenti *et al.* (2), realizaron un trabajo que busca estudiar el fenómeno de las inundaciones por medio del uso de datos multi-temporales Cosmo SkyMed. En china, en el año de 2012 Ban & Yousif, (3), realizaron un trabajo de investigación cuyo objetivo era el de examinar la efectividad de los métodos de detección de cambios en zonas urbanas y observar la rápida expansión de china. En 2013, Paul and Ramamoorthy (4), realizaron un algoritmo para la detección de cambios de imágenes SAR usando FCM y los operadores de relación *Mean-Ratio* y *Log-Ratio*. Es evidente el uso de la detección de cambios en imágenes SAR para el seguimiento de fenómenos naturales como por ejemplo las inundaciones. Como se puede observar la tendencia es usar métodos *pre-classification* como el que se expone en este trabajo.

El *Global Climate Risk Index* es un reporte en el cual se exponen los índices de riesgo climático global, este informe es publicado anualmente por la Organización No Gubernamental (ONG) alemana *Germanwatch* y es de acceso libre. En este reporte se muestra por

medio de cifras el impacto causado por los eventos relacionados con el cambio climático (inundaciones, tormentas, olas de calor, etc.) sobre algunos países. Esta organización cuenta con datos estadísticos y demográficos que datan desde 1991 a la fecha. En el último informe que corresponde al año 2014 (5), en el ranking histórico desde el año 1991 hasta el 2012 Colombia ocupa el puesto número 42 a nivel mundial en países afectados por el cambio climático, la principal causa son las inundaciones. En el ranking del 2012 el cual se muestra en este informe Colombia ocupa el puesto 25 a nivel mundial; sin embargo, la situación más crítica se produjo en el año 2010 cuando Colombia ocupó el puesto número 3 a nivel mundial, este año corresponde a la ruptura del canal del dique. Como se observa las inundaciones son una problemática que afecta directamente a Colombia por esta razón en la actualidad se busca con las nuevas tecnologías en sistemas de información geográfica monitorear diferentes zonas en riesgo de inundaciones. En Colombia la ola invernal provoca frecuentemente muchos desastres. Diferentes organizaciones del estado Colombiano poseen información espacial importante que con un debido procesamiento puede entregar una herramienta para la evaluación, prevención y seguimiento de las inundaciones. En 2010 la comisión nacional del espacio colombiano realizó un estudio a nivel nacional con las empresas públicas y privadas sobre la necesidad de la adquisición de imágenes satelitales y fortalecimiento de los procesos de investigación y desarrollo de tecnologías de observación de la tierra por medio de sensores remotos (6). Motivados en este estudio y en sus objetivos que evidencian la necesidad de investigar y desarrollar tecnologías que usen imágenes satelitales y sumado a la problemática que causan las inundaciones en Colombia se realiza este trabajo que usa imágenes satelitales tipo SAR, llamadas así debido a que son obtenidas por medio de un radar de apertura sintética. Estas imágenes juegan un papel importante a la hora de evaluar cualquier fenómeno natural sobre la tierra. Su mayor ventaja sobre otro tipo de imágenes es que pueden ser tomadas en cualquier condición climática y de tiempo. Este trabajo propone un método no supervisado de detección cambios para el estudio del comportamiento de las inundaciones en Colombia usando imágenes SAR, este método se divide en varias fases: filtrado (filtro Frost); detección de diferencias usando los algoritmos de *Mean-Ratio* y *Log-Ratio*; fusión temporal de imágenes usando el enfoque PCA; segmentación no supervisada usando

los algoritmos de *k-means* y FCM; binarización o umbralización y ecualización del histograma. El método propuesto busca integrar las ventajas de dos diferentes métodos en detección de cambios, *Mean-Ratio* y *Log-Ratio*. Se propone implementar por ventanas cada uno de estos algoritmos con la finalidad de obtener mejor precisión en la detección de cambios. Este enfoque es un método *pre-classification* en el cual es importante el proceso de segmentación, por esta razón en este trabajo también se fusiona los resultados de dos de las técnicas de segmentación no supervisada comúnmente usadas, FCM y *k-means* con el objetivo de mejorar la precisión en la detección de zonas inundadas.

2. Método propuesto

El método que se presenta en este trabajo fue implementado en MATLAB. Para la experimentación en primera instancia se generaron dos imágenes de referencia creadas a partir de zonas homogéneas de imágenes SAR reales, estas imágenes sirvieron para evaluar el desempeño del método propuesto. En segunda instancia se utilizaron imágenes tipo SAR del territorio Colombiano para el estudio del comportamiento del río, Magdalena, debido a que estas son independientes al estado climático o de tiempo en el que son tomadas, lo que permite tener una buena observación de la superficie terrestre sin la afectación de las nubes como en el caso de las imágenes ópticas. En la figura 1 se ilustra el método propuesto para la fusión temporal y detección de cambios.

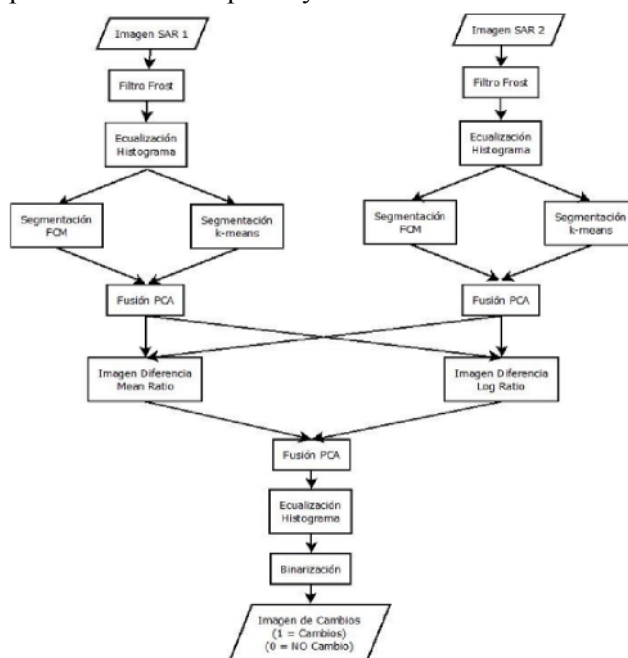


Figura 1: Método propuesto

2.1. Etapa de Filtrado

En esta etapa se procesan las imágenes para reducir el ruido *Speckle*. El filtro Frost es un algoritmo adaptativo propuesto por Frost et al. (7), en 1982, basado en el error cuadrático medio que se adapta a las estadísticas de la imagen, este algoritmo asume que el ruido es multiplicativo y aleatorio. Basa su funcionamiento en el filtro adaptativo de Wiener (8), el cual asume que el ruido y la imagen son un proceso aleatorio y su objetivo es buscar un estimativo ($\hat{f}$) que minimice el error cuadrático medio entre dos imágenes.

2.2. Etapa de Detección de Diferencias (Cambios)

En esta etapa por medio de los operadores *Mean-Ratio* y *Log-Ratio* se encuentra las diferencias entre la imagen 1 y la imagen 2. Al final de esta etapa se tendrán dos imágenes diferencia resultado de aplicar los dos operadores en ambas imágenes. Debido a que el ruido *Speckle* es aleatorio sobre toda los píxeles de la imagen, para la implementación de ambos enfoques de detección de cambios se utilizaran ventanas de 9x9. Lo anterior permite evaluar cada píxel con base a sus vecinos para determinar si este píxel cambia de una imagen a otra o simplemente es un píxel ruidoso proveniente del ruido *Speckle*. Se podría entonces decir que la detección de cambios propuesta en este método se realiza por medio de regiones. De cada ventana se calcula el promedio y con este se evalúa por medio de los enfoques de *Mean-Ratio* y *Log-Ratio* si existe o no cambios en esa región de la imagen.

2.2.1. Operador *Mean-Ratio*

El funcionamiento de este enfoque consiste en hallar la relación entre las medias de dos imágenes multi-temporales. La razón de trabajar con las medias es con el fin de reducir el efecto del ruido *Speckle* sobre las imágenes SAR. La fórmula que describe este operador de relación, por ventanas, es la siguiente:

$$X_{MR} = 1 - \min \left(\frac{\frac{1}{L} \sum_{(k,l) \in N_{ij}} X_{1(k,l)}}{\frac{1}{L} \sum_{(k,l) \in N_{ij}} X_{2(k,l)}}, \frac{\frac{1}{L} \sum_{(k,l) \in N_{ij}} X_{2(k,l)}}{\frac{1}{L} \sum_{(k,l) \in N_{ij}} X_{1(k,l)}} \right) \quad (1)$$

Donde N_{ij} denota los píxeles vecinos del píxel (i, j) dentro de la ventana y (L) el tamaño de la ventana. Al escoger el mínimo entre las relaciones de las medias de las ventanas se garantiza que los valores

resultantes estén en un rango de 0 a 1. Con base en la ecuación (1) este enfoque entrega un 0 cuando no existe un cambio entre las ventanas de las imágenes evaluadas, y valores mayores que 0 y menores que 1 cuando existe un cambio, identificando las zonas donde más existen cambios cuando el resultado es cercano a 1.

2.2.2. Operador *Log-Ratio*

Este operador de relación a diferencia del operador *Mean-Ratio* el cual basa su funcionamiento en calcular la relación que existe entre los valores de las medias locales de dos imágenes multi-temporales SAR, se enfoca en calcular la relación logarítmica existente entre dos imágenes multi-temporales. Con el operador *Log-Ratio*, el ruido multiplicativo *Speckle* puede ser transformado en un componente de ruido aditivo. El operador *Log-Ratio* el cual busca encontrar las diferencias entre dos imágenes multitemporales, se define por la siguiente ecuación:

$$XLR = \text{Log} \left(\frac{\frac{1}{L} \sum_{(k,l) \in N_{ij}} X_{2(k,l)}}{\frac{1}{L} \sum_{(k,l) \in N_{ij}} X_{1(k,l)}} \right) \quad (2)$$

La escala logarítmica se caracteriza por el aumento del valor de los píxeles con baja intensidad y la disminución del valor de los píxeles de alta intensidad, por lo tanto, la distribución de dos clases (cambio y no cambio) se podría hacer más simétrica. Sin embargo, la información de las regiones modificadas que se obtiene por el operador *Log-Ratio* puede no ser capaz de reflejar la verdadera tendencia de cambio en la mayor medida posible a causa de la disminución del valor de los píxeles en las áreas con alta intensidad dentro de la imagen.

2.3. Fusión Temporal de Imágenes

La fusión de imágenes se usa para combinar información procedente de diferentes fuentes con el fin de entregar una imagen de mayor calidad que las imágenes de entrada cuando estas se consideran de forma aislada. Pajares & Cruz (9). En este trabajo la fusión se utiliza en dos partes: la primera para fusionar las imágenes diferencia resultado de los operadores *Mean-Ratio* y *Log-Ratio*; y la segunda para fusionar los resultados de las segmentaciones de los métodos de FCM y *k-means*. La razón de realizar un proceso de fusión es la de complementar la información

en cada fase del método propuesto en este trabajo; por ejemplo obtener una imagen diferencia que una las ventajas de cada operador y una imagen segmentada con mayor precisión. Como la fusión se realiza sobre imágenes con la misma resolución espacial pero con diferente resolución temporal se considera como Fusión Temporal.

El enfoque fusión escogido para implementar en este trabajo fue el basado en análisis por componentes principales (PCA). Este método consiste realizar una transformación orto normal de dos imágenes de entrada cuya dimensión es de $(N \times M)$. El algoritmo de PCA implementado es explicado en (9).

2.4. Ecualización del Histograma

La ecualización del histograma es una técnica que consiste en ajustar el nivel de la escala de grises de una imagen. Esta técnica se basa en una transformación del histograma con el fin de proporcionar una imagen cuyo histograma sea uniforme y bien distribuido. Esta etapa se realiza en dos partes del método propuesto: la primera después de la etapa de filtrado con el objetivo de evitar falsas diferencias en la etapa de detección de cambios, estas falsas diferencias pueden producirse si las imágenes procesadas no tienen una distribución de niveles de grises similar debido a que por ejemplo provienen de diferentes sensores remotos; la segunda vez que se aplica esta etapa es después de la fusión de los resultados de las dos técnicas de segmentación, que se mencionan más adelante, con el fin de separar bien las clases (firmas espectrales) que entrega este proceso.

2.5. Fase de Segmentación

La segmentación busca extraer características de las imágenes como: puntos de interés, bordes, contornos, regiones, etc. Este proceso divide la imagen en grupos de píxeles u objetos dando como resultado un conjunto de segmentos que cubren la imagen, o un conjunto de curvas de nivel extraídas de la imagen. Dass *et al.* (10). FCM y *k-means* son métodos de segmentación basados en *Clustering* los cuales buscan agrupar píxeles en *Clusters*. Los algoritmos de FCM y *k-means* son enfoques interactivos que de manera autónoma agrupan datos dentro de las imágenes entregando como resultado una imagen segmentada en colores, textura, intensidad o una mezcla de los

anteriores. Avendaño & Parra (11). Los algoritmos de segmentación FCM y *k-means* implementados en este proyecto son explicados en (11).

2.6. Fase de Binarización

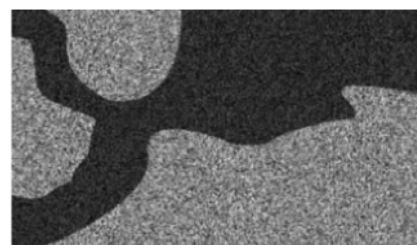
Esta es la última etapa del método propuesto y busca etiquetar cada píxel de la imagen resultante con 1 cuando existe cambio y 0 cuando no. Para esto se usa la segmentación por umbral conocida como bancarización debido a que la imagen resultante solo comprende valores Booleanos (0 y 1). (9)

3. Experimentación y Resultados

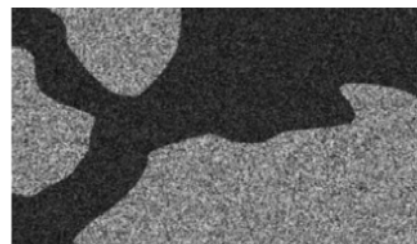
En este capítulo se experimentara sobre el método propuesto. La experimentación tendrá dos partes: la primera consistir en evaluar cada fase del proceso y evaluar su desempeño usando dos imágenes de referencia; la segunda parte consistirá en emplear el método propuesto sobre imágenes SAR de Colombia.

3.1. Imágenes de Referencia

Para poder evaluar el desempeño del método propuesto y de cada una de sus fases fue necesario crear dos imágenes sintéticas a partir de zonas homogéneas de las imágenes SAR de Colombia utilizadas en este estudio. Estas imágenes al ser creadas por el usuario permiten conocer los cambios exactos entre ellas, permitiendo a lo último evaluar los resultados que entrega el método propuesto.



(a) Imagen 1



(b) Imagen 2

Figura 2: Imágenes de Referencia

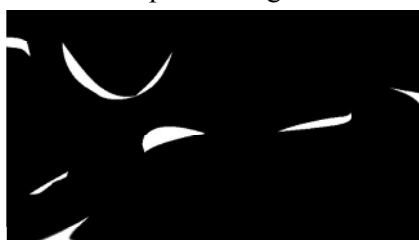
Estas imágenes tienen un tamaño de 460x819 píxeles y se crearon con base en una imagen real tratando de simular un río y los terrenos cercanos al mismo. Las imágenes de la figura (2) solo tienen dos grupos de píxeles, los correspondientes a tierra y los correspondientes a agua. Cabe resaltar que estas imágenes de referencias al ser creadas de imágenes SAR traen consigo ruido *Speckle*.

3.2. Índices de evaluación

Con el fin de evaluar el desempeño de la metodología propuesta se hará uso de la matriz de confusión y de los índices *Overall Accuracy* y Kappa, (12). Estos índices miden la eficiencia del método a la hora de encontrar diferencias. El efecto del ruido *Speckle* sobre las imágenes hace que se generen falsos positivos en la detección, este método busca en primera instancia eliminar este efecto sobre las imágenes, pero se sabe que esto no es del todo suficiente, por eso en el método de detección de diferencias implementado se implementaron ventanas con la finalidad de tener en cuenta la información de los píxeles vecinos de la imagen.

3.3. Detección de cambios de las imágenes de referencia

A continuación se muestran los resultados encontrados de aplicar el método propuesto aplicando 3 veces el filtro Frost a las imágenes de referencia y utilizando 2 *cluster* para la segmentación.



(a) Imagen de cambios (Referencia)



(b) Imagen de cambios resultante

Figura 3: Imagen de cambios de referencia vs. Imagen encontrada

Los píxeles blancos indican cambios en la imagen, mientras que los negros indican lo contrario. Al evaluar el resultado método propuesto se obtuvo un *Overall Accuracy* del 99.4 % y un índice Kappa de 0.89 que indican un nivel de precisión alto y un índice de concordancia casi perfecto. Los valores anteriores fueron tomados de la matriz de confusión que se genera al comparar la imagen de cambios (referencia) y la imagen de cambios resultante. Estos resultados también pueden ser comprobados de forma visual en la figura (3), donde se evidencia que la imagen de cambios que entrega el método propuesto es muy parecida a la de la referencia.

3.4. Caso de Estudio

En las secciones anteriores se evaluó la precisión del método propuesto usando imágenes de referencia, ahora es momento de implementar el método propuesto sobre imágenes reales de zonas Colombianas. La zona escogida fue la del magdalena bajo en el municipio del Plato Magdalena. Se escogió esta zona del territorio colombiano debido a que esta zona es fuertemente afectada por el tema de las inundaciones. Una de las imágenes utilizadas corresponde a una inundación que se presentó en el año de 2010, época en la que se rompió el canal del dique y que trajo bastantes estragos para Colombia. La otra imagen utilizada corresponde a esta misma zona pero en épocas donde no está inundado. Las imágenes utilizadas provienen del sensor remoto RADARSAT-2, tiene polarización HH, una resolución radiométrica de 16 bits y una resolución espacial de 10 metros. Estas imágenes fueron suministradas por el IDEAM para el desarrollo de este proyecto. Las imágenes entregadas por el IDEAM cubren gran parte del río magdalena razón por la cual tuvieron que ser cortadas para enfocarse en el caso de estudio.

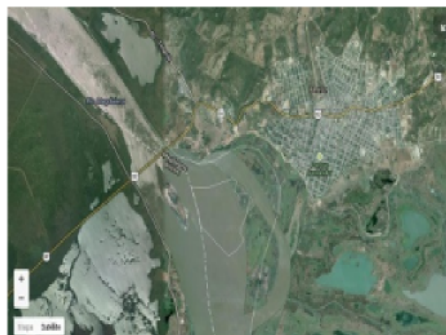


Figura 4: Plato Magdalena - Fuente: Google Earth

En la figura 4 se ilustra una imagen satelital Landsat del municipio del plato magdalena, esta imagen fue tomada de Google Earth. Como se puede observar este municipio está realmente cercano a las orillas del río Magdalena lo que lo hace vulnerable cuando el nivel de este río aumenta. La ubicación del este municipio se encuentra en $79^{\circ} 77'$ de longitud occidental y $9^{\circ} 48'$ de latitud norte. El clima promedio en esta zona de Colombia es de 32°C y la altura promedio sobre el nivel del mar es de 20 metros. Para detectar los cambios del río se hará uso del método propuesto. A continuación se ilustran las imágenes usadas y los resultados obtenidos.

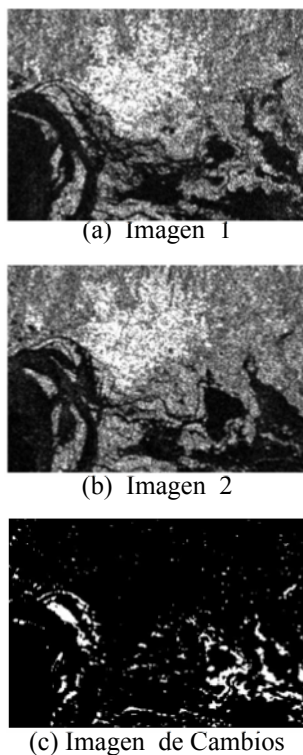


Figura 5: Imágenes de caso de estudio

En la figura 5 se muestran los resultados de aplicar el método propuesto sobre las imágenes del caso de estudio. Las imágenes (1) y (2) tienen un tamaño de

312x4446 píxeles, como se conoce la resolución espacial de estas imágenes es posible determinar el área de cambios dentro de la imagen; como la resolución espacial es de 10 metros esto quiere decir que cada píxel dentro de la imagen representa 100 m². El resultado encontrado fue que el área de cambios que encontró el método propuesto es de 1,315,100m², lo que equivale a que 131,51 Hectáreas de 138,715 cambiaron entre las dos imágenes

4. Conclusión

Este trabajo presenta un método para la detección de cambios *pre-classification* en zonas de inundación en Colombia utilizando imágenes SAR. En primera instancia se filtraron las imágenes con el objetivo de eliminar el efecto del ruido *Speckle* característico en dichas imágenes, después se realizó un proceso de segmentación para agrupar los píxeles que corresponden a la clase agua y finalmente se detectó los cambios entre las imágenes usando operadores de relación, *Mean-Ratio* y *Log-Ratio*. Los resultados obtenidos al aplicar el método propuesto sobre imágenes de referencia, creadas a partir de zonas homogéneas de imágenes SAR de Colombia, arrojaron una precisión del 99.4 % y un índice de concordancia de 0.89 lo que concluye que el método propuesto es altamente eficiente para la detección de cambios sobre el conjunto de datos usado. Al aplicar el método propuesto sobre las imágenes, una antes y otra después, del caso de estudio correspondientes a una inundación que se presentó en el año de 2010 en la zona del Magdalena bajo se encontró que 77.46 hectáreas del municipio del Plato-Magdalena fueron inundadas por el río.

Agradecimientos

Agradecemos al IDEAM por las imágenes SAR que facilitaron para el desarrollo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Xu M, Xia Z, Zhang F, Li K, Xie C. Multi-Temporal Polarimetric SAR and Optical Data Fusion for Land Cover Mapping in Southwest China. In: Multimedia Technology (ICMT), 2010 International Conference on; 2010. p. 1–4.
2. Pulvirenti L, Chini M, Pierdicca N, Guerriero L, Ferrazzoli P. Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation. *Remote Sensing of Environment*. 2011;115(4):990 – 1002. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425710003408>.
3. Ban Y, Yousif OA. Multitemporal Spaceborne SAR Data for Urban Change Detection in China. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*. 2012 Aug;5(4):1087–1094.
4. Paul L, Ramamoorthy DP. Synthetic Aperture Radar Image Change Detection Using Fuzzy C-Means Clustering Algorithm. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. 2013 March;2:1374 – 1379.
5. Kreft S, Eckstein D. Global Climate Risk Index 2014. Germanwatch; 2013.
6. Arias LP, Santacruz AM, Posada E. Programa satelital colombiano de observación de la Tierra: una estrategia de innovación y desarrollo tecnológico para Colombia. *Análisis Geográficos*. 2010;(44):176.
7. Frost VS, Stiles JA, Shanmugan KS, Holtzman J. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*. 1982 March;PAMI-4(2):157–166.
8. Wiener N. *Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series*. The MIT Press; 1964.
9. Pajares G, de la Cruz Garcia JM. *Ejercicios resueltos de Vision por Computador*. Mexico D.F., 221 Mexico: Alfaomega; 2008.
10. Dass R, Priyanka, Devi S. Image Segmentation Techniques. *International Journal of Electronics & Communication Technology IJEC*. 2012 March;3(14):66–70.
11. Avendaño J, Parra J. Segmentación y clasificación de imágenes SAR en zonas de inundación en Colombia, una herramienta computacional para prevención de desastres. *INGE@UAN*. 2014;4(8).
12. Liu C, Frazier P, Kumar L. Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*. 2007;p. 606–616.

MÉTODO GEOESTADÍSTICO DE RESTAURACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT EN TERRITORIOS NUBLADOS

GEOSTATISTICAL METHOD OF SATELLITAL IMAGE RESTORATION LANDSAT IN CLOUDY TERRITORIES

Victor Flores Benites¹

¹. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
E-mail:suryavf@gmail.com

Recibido: 3 Diciembre

Aceptado: 15 Diciembre

*Correspondencia del autor. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
E-mail:suryavf@gmail.com

RESUMEN

Las imágenes satelitales son una fuente de importante de información en el estudio de la superficie terrestre. El resultado de su análisis es influenciado por las condiciones atmosféricas en las que fueron tomadas. La nubosidad es la interferencia más común y su presencia puede ser perjudicial al procesamiento. En el presente trabajo se busca eliminar nubosidad en las imágenes satelitales, para esto se realiza una estimación de la superficie debajo de las nubes. Se propone una solución basada en GNSPI, método geoestadístico ideado originalmente para remoción de huecos (regiones no escaneadas por el satélite) provocados por una falla en el sensor SLC del satélite Landsat-7. Se ha demostrado que existe una relación lineal entre imágenes tomadas en diferentes fechas. Por tanto, podemos realizar una estimación de la superficie debajo de las nubes a partir de una imagen sin nubes. La estimación calculada (predicción temporal) no es completa ya que no considera las variaciones locales del suelo, por lo que es necesario una segunda estimación. La predicción de las variaciones locales es realizada mediante un método geoestadístico: Kriging. La principal ventaja de este método geoestadístico frente a los deterministas es que tiene buenos resultados en superficies heterogéneas. Partimos del supuesto que pixeles similares muestran patrones similares en la variación espectral entre diferentes fechas. Por lo tanto, se puede obtener una buena estimación si se utiliza exclusivamente los pixeles similares para la predicción. La estimación final es la suma de la estimación temporal más la estimación local..

Palabras claves: remoción de nubes; GNSPI; geoestadística; kriging; pixeles similares.

ABSTRACT

Satellite images are an important source of information in the study of the earth's surface. The result of their analysis can be influenced by atmospheric conditions in which they were taken. Cloudiness is the most common interference and its presence can be detrimental to processing. The objective of this study is to eliminate clouds on satellite imagery. Consequently, a surface estimate beneath the clouds is carried out. A method based on GNSPI is proposed. This is a geostatistical method originally devised for removal of voids (regions scanned by the satellite) caused by a fault in the SLC sensor Landsat-7 solution. It has been shown that there is a linear relationship between images taken at different dates. Therefore, we can make an estimate of the surface beneath the clouds from an image without clouds. The calculated estimate (temporal prediction) is not complete and does not consider local variations soil, so a second estimate is needed. The prediction of local variations is performed using a geostatistical method: Kriging. The main advantage of this geostatistical method over the deterministic is that it has good results on heterogeneous surfaces. We assume that similar pixels show similar patterns in the spectral variation between different dates. Therefore, one can get a good estimate if used exclusively similar pixels for prediction. The final estimate is the sum on the temporal estimate and the local estimate.

Keywords: clearing clouds; GNSPI; geostatistics; kriging; Similar pixels.

I. INTRODUCCIÓN

La presencia de nubes en las imágenes capturadas por satélites es un problema común: el 98% de las imágenes las contiene. Por lo general se suele elegir un umbral de nubosidad, las imágenes que poseen un porcentaje de nubosidad menor al umbral se procesan sin tomar en cuenta que existen nubes en la escena, trayendo consigo imperfecciones en los resultados. Una mejor solución es la segmentación de las nubes para

luego no contarlas en el procesamiento, obteniendo resultados más fiables y dando la posibilidad de que el umbral de nubosidad sea mayor, pero en muchas ocasiones la pérdida de información por la segmentación es crítica. La estimación de la superficie debajo de las nubes puede ser una mejor solución. Se han realizado diversos estudios de cómo realizarla, en general las diversas soluciones se pueden clasificar en dos: métodos determinísticos y métodos geoestadísticos

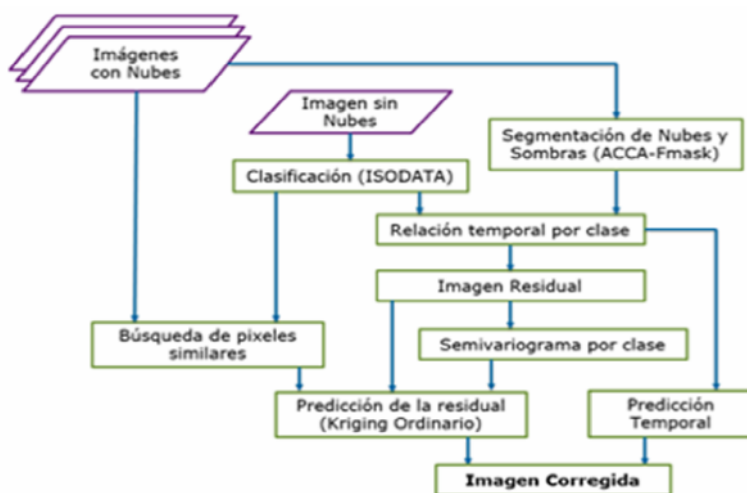


Figura. 1. Esquema general del Algoritmo. Se toma como base GNSPI (2)

La ventaja de utilizar los métodos determinísticos es que en el procesamiento solo se utiliza la imagen a reparar, dando una solución sencilla y con baja carga computacional. En este caso, la familia de soluciones más comunes y simples son las interpolaciones por aproximación a funciones, aquí se estima los píxeles faltantes (correspondientes a nubes) usando los píxeles vecinos; esta solución dan malos resultados a media resolución y peores resultados en alta resolución. Una mejor solución es NSPI (1) (una solución popular de rellenado de huecos de imágenes Landsat-7), este enfoque fue exitoso al predecir características pequeñas del paisaje, pero al ser un método determinista no pudo introducir incertidumbre a la estimación.

La otra familia de soluciones son los geoestadísticos, su principal ventaja es tomar en cuenta la distribución espacial de la varianza (semivariograma). Los resultados obtenidos por estos algoritmos suelen ser mejores para imágenes de alta concentración de detalle, pero resulta ser poco eficiente en entornos suaves (como líneas de carretera). La razón de esta debilidad de los métodos geoestadísticos puede ser la suposición de estacionalidad intrínseca que no siempre es válido especialmente para los paisajes homogéneos (2).

Teniendo en cuenta la ventaja que poseen los algoritmos deterministas y geoestadísticos, en el presente trabajo se propone una solución que fusiona ambos enfoques. Para esto se toma de modelo la solución presentada por Xiaolin Zhu, Desheng Liu y Jin Chen en “A new geostatistical approach for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images” (2): GNSPI. Este método, al igual que el NSPI, fue presentado para solucionar un problema de píxeles no escaneados del satélite Landsat-7.

II. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO

Para la remoción y llenado de las nubes, el algoritmo utiliza varias imágenes auxiliares que fueron tomadas en la misma área. Una de estas imágenes será libre de nubes, a la que denominaremos TM0. Las siguientes imágenes contendrán nubes y serán reparadas, su denominación será TM1, TM2.

Se ha demostrado que existe una relación lineal entre píxeles correspondiente a una misma clase de superficie de una misma banda tomadas en diferentes fechas (3). De esta relación podemos obtener una predicción de la escena para cualquier fecha cercana a la captura de TM0 (2). Pero esta relación solo toma en cuenta

variaciones globales de la superficie y no las variaciones locales que son propias de la naturaleza del suelo. De este análisis podemos concluir que nos encontramos ante dos problemas: el cálculo de la variación global y variación local. La variación global es calculada con una regresión lineal aprovechando la relación entra las imágenes de diferentes fechas (3), al resultado de este cálculo lo denominaremos predicción temporal. El cálculo de la variación local es realizado por el método geoestadístico Kriging y su resultado la denominaremos predicción residual. En la Figura 1 se muestra un esquema general del algoritmo, en las siguientes secciones cada paso será explicado a detalle.

A. Segmentación de Nubes y Sombras

Los algoritmos de reconocimientos de nubes son muy variados, siendo uno de lo más difundidos ACCA (4) (5). El algoritmo clasifica la escena en posibles regiones con nubes (ambiguas), regiones con nubes calientes y frías utilizando el índice NDSI (índice de nieve), temperatura y relación de la reflectancia entre bandas. Las regiones marcadas como ambiguas entran en un segundo procesamiento en donde los umbrales dependen de la temperatura de la escena, de la presencia de nieve y regiones desérticas.

ACCA no localiza las sombras de las nubes, por lo cual fue necesario el uso de otro algoritmo para su segmentación. Se utilizó Fmask para este fin (6). Este algoritmo utiliza el modelo de elevación digital de la Banda 4, en el que realiza una transformación morfológica de rellenado. Si la diferencia entre la transformada y la imagen original es mayor a un umbral, 0.02 (6), se clasificará el píxel como sombra.

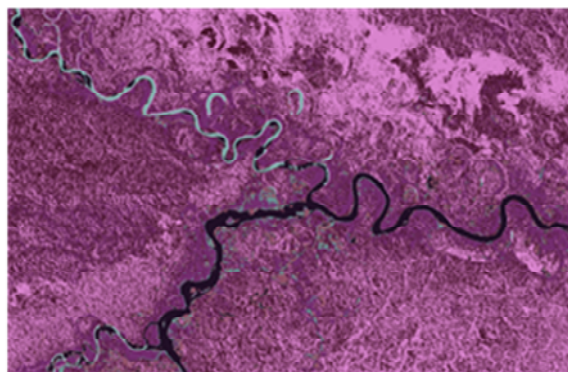


Figura. 2. Resultado de la clasificación por ISODATA

B. Clasificación de la escena (Clustering)

Para que el algoritmo se ejecute correctamente es necesario una buena clasificación. Se opta por el uso de una técnica no supervisada de clasificación, ISO-

DATA (7), para que el programa no requiera de una intervención adicional en el procesamiento. Este algoritmo divide, fusiona y elimina grupos según parámetros previamente asignados. La división de un grupo es efectuada cuando este posee una desviación estándar (dispersión) superior a un umbral asignado. La fusión de grupos es efectuada cuando la distancia euclidiana de los centros de dos clusters es menor a un valor asignado. La eliminación de grupos se da cuando este posee un número reducido de miembros.

La clasificación de escena es solo realizada en la imagen TM0 debido a que en la imagen TM1 no es posible conocer la configuración de la superficie debajo de las nubes. La clasificación calculada es usada en los siguientes pasos para la imagen TM1.

C. Calculo de la Relación Temporal

La relación lineal entre las imágenes TM0 y TM1 es planteada en la Ecuación 1 (1), en donde R es la reflectancia en la posición s y banda b en el instante t1 o t2. Los coeficientes a_k y b_k son calculados con regresión lineal.

$$\hat{R}(s, t_2, b) = a_k \hat{R}(s, t_1, b) + b_k \quad (1)$$

Esta relación no toma en cuenta las variaciones locales en el tiempo, por lo que tendremos un error de predicción. El error de predicción es calculado con la Ecuación 2 en donde se resta la reflectancia real de la superficie menos la reflectancia estimada en la Ecuación 1. Al resultado la denominaremos imagen residual.

$$f(s, b) = R(s, t_2, b) - \hat{R}(s, t_2, b) \quad (2)$$

El error de predicción no puede ser calculado en áreas con presencia de nubes ya que no tenemos datos de la superficie debajo de ellas. El objetivo de los siguientes pasos será la estimación del valor residual de la superficie debajo de las nubes.

D. Semivariograma

El semivariograma es la función que describe la variabilidad espacial de un fenómeno de interés. Matemáticamente, es la representación gráfica de las varianzas en función de la distancia que separa a las muestras, es calculada mediante la Ecuación 3 en donde Z es una característica medida en el punto si.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(s_i) - Z(s_i + h)]^2 \quad (3)$$

El semivariograma es más útil si es relacionado a una función matemática, en el presente trabajo se aproxima al modelo exponencial (Ecuación 4).

$$\gamma(h) = (s - n) \left(1 - e^{-\frac{dn}{r}}\right) + n \quad (4)$$

E. Ajuste de Curva por Algoritmo Genético

El ajuste del modelo del semivariograma es realizado por un Algoritmo Genético Adaptativo planteado por Jiao Lei-yin, Lei Hong-zhuan (8). Esta variación de AG tiene como particularidad que la función de adaptación, la probabilidad de cruce y de mutación depende de la generación en la que nos encontremos. Estas obedecen a las Ecuaciones 5, 6 y 7 respectivamente.

$$f^r = e^{-\frac{ls}{k}}; T_k = \frac{T_0}{k} \quad (5)$$

$$F_c = \begin{cases} P_1 + \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2 & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_m = \begin{cases} p_2 + \frac{k_3(f_{\max} - f^r)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f^r \geq f_{\text{avg}} \\ k_4 & f^r < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

Donde, $f_{\max}$ es la máxima adaptación de la población, f_{avg} es la adaptación promedio, f es la adaptación máxima entre los dos individuos a cruzarse, f^r es la adaptación de un individuo, k es la generación actual, ls es el error cuadrático medio del ajuste de curvas actual. T_0 , k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , P_1 , P_2 son constantes.

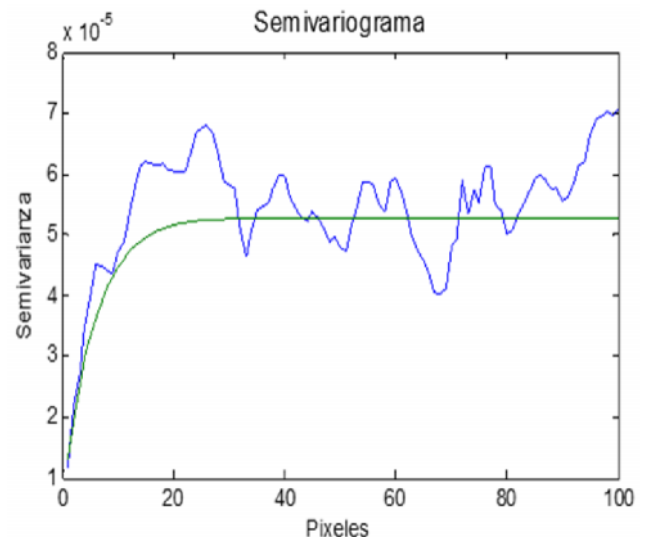


Figura. 3. Semivariograma. La curva experimental es mostrada en color azul y el resultado del ajuste de curvas en verde.

F. Píxeles similares

Pixel similar es un concepto introducido en “A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM plus SLC-off images” (1). La similitud espectral es definida con la Ecuación 8. Si dos píxeles cumplen con la Ecuación 9 se dicen que son similares. En las ecuaciones: RMSD (root mean square difference) es la raíz cuadrada de la media del cuadrado de diferencias entre valores de reflectancia de dos píxeles por banda; n es el número de bandas; m es el número de grupos (clusters); $\sigma(b)$ es la varianza por banda.

$$RMSD_i = \sqrt{\frac{\sum_{b=1}^n (R(s_i, b) - R(s_j, b))^2}{n}} \quad (8)$$

$$RMSD_i \leq \left[\sum_{b=1}^n \sigma(b) \right] / M \quad (9)$$

Partimos del supuesto que los píxeles especialmente adyacentes con alta similitud espectral tienen patrones cambiantes similares. Entonces, para predecir el

valor residual de un píxel correspondiente a la superficie debajo de la nube, se buscarán los píxeles que le son similares. Esta búsqueda se realiza en las imágenes en donde esos píxeles no se encuentren cubiertos por nubes.

G. Kriging

El Kriging es un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de variograma para la obtención de datos. Sea el campo aleatorio $Z(s)$: $s \in D \subset R^d$ donde se ha observado el atributo Z en las ubicaciones $s_1, s_2, \dots, s_n$ y se desea predecir dicho atributo en una ubicación no observada, s_0 , basándose en los valores obtenidos en las muestras hechas.

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n m_i Z(s_i) \quad (14)$$

Un método de cálculo de los factores de ponderación (λ_i) es el Kriging Ordinario, en donde se asume que la variable es estacionaria con varianza conocida y media desconocida. De acuerdo a estas premisas se puede demostrar que λ_i cumple la condición 15.

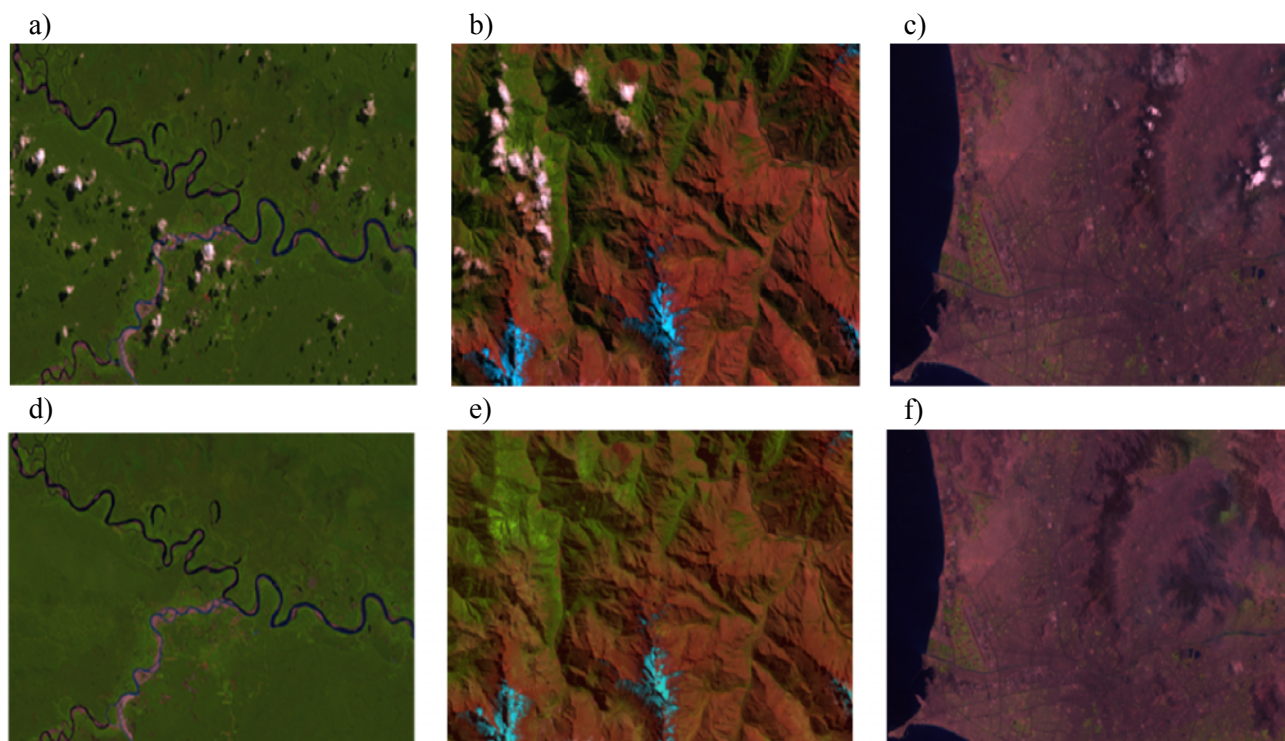


Figura. 4 Imágenes en falso color, modelo 543. En las imágenes a), b) y c) se muestran las imágenes originales. En las imágenes d), e) y f) se muestra el resultado del algoritmo. La imagen a) fue capturada en Loreto, la imagen b) en Cusco, y la imagen c) en Lima.

$$\sum_{i=1}^n m_i Cov(s_i - s_j) - n = Cov(s_i - s_j) \quad (15)$$

Para predecir el valor residual del pixel p_i de la imagen TM1, se buscarán que pixeles son similares a él en la imagen TM0 (en donde tenemos información de su naturaleza espectral) y se usarán estos para el cálculo de los parámetros λ_i . Un mejor resultado se obtiene si adicional a la búsqueda en la imagen TM0 se realiza otra búsqueda en una imagen TM2 en donde no existan nubes en la ubicación del pixel p_i . Encontrados los pixeles similares en TM0 y TM2, se utilizarán los pixeles similares en ambas imágenes para el cálculo de los parámetros λ_i .

III. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El algoritmo fue probado en imágenes capturadas por el satélite Landsat-5, los ensayos fueron realizados en las primeras 5 bandas. Los resultados son mostrados en falso color con el modelo 543 en la Figura 4.

Durante las pruebas se ha encontrado que una omisión de pixeles en la clasificación de nubes y sombras altera seriamente la respuesta, ante este problema se prefirió utilizar umbrales que puedan exagerar la detección. Además se utilizó el operador morfológico de dilatación sobre la salida de ACCA y Fmask para garantizar que las nubes y sombras sean segmentadas en su totalidad.

La calidad del resultado del algoritmo depende principalmente del clustering, del ajuste de curvas del semivariograma y de la selección de pixeles a utilizar en Kriging. Una pobre clasificación de la superficie conlleva a la falta de detalles en el resultado pero una clasificación minuciosa eleva el tiempo de ejecución. De acuerdo a los ensayos, recomendamos un número inicial de 10 clusters.

Se encontraron casos en que el semivariograma experimental tenía un rango menor a 10 pixeles (300 metros), generando problemas en el ajuste de curvas. Para hacer frente a este problema, el ajuste fue realizado con muestras de hasta 50 pixeles de distancia. Se obtiene un buen desempeño del AG con la normalización del semivariograma y la acotación de la búsqueda

del Sill, Nugget y Rango. En la curva normalizada, el rango de búsqueda del Sill fue de 0.7 a 1, del Nugget de 0 a 0.2 y del Rango de 5 a 30. El resultado del ajuste es mostrado en la Figura 3.

La predicción residual es realizada con Kriging mediante la suma ponderada mostrada en la ecuación 14, en donde los parámetros λ_i son calculados con la ecuación 15, esta ecuación utiliza los pixeles similares que son definidos mediante la ecuación 9. La búsqueda de los pixeles similares es realizada por cada pixel de la imagen, en consecuencia, la carga computacional añadida es muy alta. El tiempo de ejecución de Kriging también es grande: aumenta exponencialmente con el tamaño de la imagen y la cantidad de nubes presentes. La carga computacional añadida es tan grande puede representar el 90% del total. Para resolver estos problemas se ideó una estrategia en la búsqueda de los pixeles similares. Se definió un número máximo de pixeles similares y su búsqueda fue radial al pixel analizado con tal de asegurarnos de seleccionar a los vecinos cercanos, además se definió un rango máximo de búsqueda. El número máximo de pixeles similares disminuyó en gran medida el tiempo necesario para la ejecución de Kriging y el rango máximo de búsqueda disminuyó el tiempo necesario para definir los pixeles similares.

IV. CONCLUSIONES

Con el algoritmo propuesto se ha conseguido realizar una correcta remoción de nubes, Kriging generó una buena predicción en regiones homogéneas y heterogéneas. El algoritmo tiene buenos resultados pero es débil ante los fallos de la segmentación de nubes y sombras, por lo que una exageración en su reconocimiento es recomendable. Además, el costo de un buen resultado es el incremento del tiempo de ejecución. Se recomienda realizar un análisis del tiempo de ejecución versus resultado para la aplicación específica en el que se desea utilizar el algoritmo. Se recomienda realizar un estudio de paralelización del algoritmo para tener un mejor resultado en tiempo de ejecución.

BIBLIOGRAFÍA

1. Chen, J., Zhu, X., Vogelmann, J. E., Gao, F., & Jin, S. M. (2011). "A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM plus SLC-off images".
2. Xiaolin Zhu, Desheng Liu, Jin Chen. (2012). "A new geostatistical approach for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images".
3. Zhu, X., Chen, J., Gao, F., & Masek, J. G. (2010). "An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions".
4. Richard R. Irish. "Landsat 7 Automatic Cloud Cover Assessment". Science Systems and Applications, Inc. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
5. Richard R. Irish, John L. Barker, Samuel N. Goward, and Terry Arvidson. "Characterization of the Landsat-7 ETM+ Automated Cloud-Cover Assessment (ACCA) Algorithm". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.
6. Zhe Zhu, Curtis E. Woodcock. "Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery". Center for Remote Sensing, Department of Geography and Environment, Boston University.
7. Memarsadeghi N., Mount D. M., Netanyahu N. S., & Le Moigne J. (2006). "A Fast Implementation of the ISODATA Clustering Algorithm".
8. Jiao Lei-yin, Lei Hong-zhuan. "The Application of Improved Genetic Algorithm in Fitting the Spatial Variogram". 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology.
9. Lazaros Oreopoulos, Michael J. Wilson, Tamás Várnai. (2011). "Implementation on Landsat Data of a Simple Cloud-Mask Algorithm Developed for MODIS Land Bands".
10. Qi Chen, Peng Gong. (2004). "Automatic Variogram Parameter Extraction for Textural Classification of the Panchromatic IKONOS Imagery"

EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS FRECUENCIALES EN REGISTROS EEG A PARTIR DE LA TRANSFORMADA WAVELET

EXTRACTION OF FREQUENCY CHARACTERISTICS FROM EEG REGISTNES USING WAVELET TRANSFORM

Alexander Jaramillo García¹, Daniel F. Acosta García², John F. Ochoa Gómez³

- ¹. GIBIC/Laboratorio de Neurofisiología GNA-GIBIC, Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia. E-mail: alexander.jaramillo@udea.edu.co
- ². GIBIC/Laboratorio de Neurofisiología GNA-GIBIC, Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia. E-mail: fabian.acosta@udea.edu.co
- ³. GIBIC/Laboratorio de Neurofisiología GNA-GIBIC, Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia. E-mail: john.ochoa@udea.edu.co

Recibido: 3 Diciembre

Aceptado: 15 Diciembre

*Correspondencia del autor. GIBIC/Laboratorio de Neurofisiología GNA-GIBIC, Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia.

RESUMEN

La identificación de características oscilatorias en señales electroencefalográficas (EEG) ha sido ampliamente estudiada debido al bajo costo de la técnica y la utilidad de la información que provee. En el presente trabajo se introduce un esquema para el estudio de registros EEG usando Wavelet en un grupo de sujetos sanos bajo dos condiciones: reposo y memoria. Se empleó la Transformada Discreta de Wavelet (DWT) para obtener coeficientes con información frecuencial y temporal. A continuación se extrajeron las diferencias asociadas al cambio de condición entre los ritmos cerebrales en un conjunto de regiones de análisis. Mediante análisis de varianza se encontró que el mayor aporte de variabilidad está relacionado con el ritmo β y se verificó que el comportamiento de los ritmos α , β y γ concuerda con investigaciones previas sobre procesos de memoria. El esquema propuesto constituye un primer paso en la construcción de una metodología de análisis orientada al estudio de sujetos con Enfermedad de Alzheimer..

Palabras claves: transformada wavelet, electroencefalografía, medidas biomédicas, análisis estadístico, análisis espectral.

ABSTRACT

The identification of oscillatory characteristics in (EEG) electroencephalographic signals has been widely studied due to the low cost of the technique and the use of information it provides. in this work, a scheme for the study of EEG registries using Wavelet in a group of healthy subjects - under two conditions: idleness and memory - has been introduced. DWT Discrete Wavelet Transform was used in order to obtain coefficients with frequency and temporal information. Then, differences associated to condition change among cerebral rhythms in a set of analysis regions were extracted. Through the variance analysis, it was found that the largest contribution of variability is related to the β rhythm and it was verified that the behavior of α , β and γ is in agreement with prior research on memory processes. The proposed scheme constitutes the first step in the construction of an analysis methodology oriented to the study of subjects suffering from Alzheimer disease.

Keywords: Wavelet Transform, electroencephalography, biomedical measures, statisticat analysis, spectral analysis.

I. INTRODUCCIÓN

El Electroencefalograma (EEG) es un registro de la actividad eléctrica cerebral obtenida a partir de electrodos ubicados en el cuero cabelludo. En los últimos años se ha apreciado un crecimiento en el estudio de EEG y los métodos para su respectivo análisis cuantitativo, dándole un enfoque de estudio desde el dominio del tiempo y frecuencia (1).

El análisis del espectro de energía representa los datos de EEG originales, que vienen expresados en series de tiempo (amplitud/tiempo), como energía contra frecuencia. Para obtener el espectro de energía de una señal EEG se puede utilizar el periodograma de Welch que se basa en la Transformada Rápida de Fourier (FFT) (2).

Se ha demostrado que la FFT no sirve para la localización simultánea de eventos en el dominio del tiempo y la frecuencia. En este sentido, la Transformada de Wavelet (WT) es una herramienta más adecuada para extraer información de señales con pocos componentes de frecuencia fundamentales, como es el caso de la mayoría de las señales de origen fisiológico (3).

El procesamiento de señales biomédicas tiene varios problemas relacionados con la falta de estacionariedad que impide encontrar un patrón o periodicidad identificable (4). Es por esto que el uso de métodos derivados del análisis de Fourier es menos efectivo, por lo que la WT se convierte en una alternativa que provee buena resolución temporal a altas frecuencias y buena resolución frecuencial en registros de corta duración (4).

La Transformada Discreta de Wavelet (DWT) es una implementación de la WT utilizando un conjunto discreto de escalas y translaciones y se calcula mediante la aplicación sucesiva de filtrados pasa-bajo y pasa-alto de la señal de dominio discreto (Figura 1) conocido como el algoritmo de Mallat o descomposición en árbol de Mallat. En la figura 1 la señal se representa por la secuencia $x[n]$, donde n es un número entero.

En cada nivel, el filtro pasa alto produce información detallada, $h_i[n]$, mientras que el filtro pasa bajo produce información aproximada $a_i[n]$ (5).

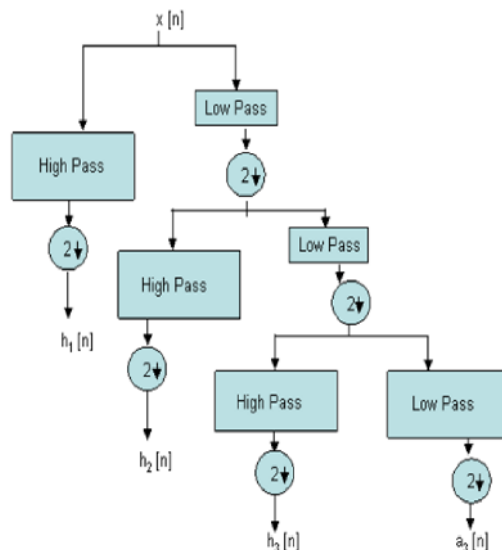


Figura. 1. Árbol de descomposición Mallat de wavelet de nivel 3 (5).

La distribución topográfica y frecuencial son fundamentales en la identificación de actividad cerebral. El primero implica que la actividad tiene una distribución específica en las distintas áreas (central, frontal, temporal, entre otras según definición) y el segundo advierte que la actividad rítmica adopta distintas bandas de frecuencia (6). El EEG se puede dividir en: Alfa (α), Beta (β), Theta (θ), Delta (δ) y Gamma (γ). El ritmo alfa se puede dividir en lenta (α_1) y rápida (α_2). Estos ritmos tienen la siguiente distribución de rangos: alfa entre 8-13 Hz (α_1 de 8-10 Hz y α_2 de 10-13 Hz), Beta entre 13-30 Hz, Theta entre 4-8 Hz, Delta menores de 4 Hz y Gamma entre 30-80 Hz (3).

La motivación principal del presente trabajo es implementar una metodología que permita distinguir, mediante análisis espectral, los cambios en la actividad eléctrica asociados a diferentes estados de procesamiento mental. El artículo está estructurado de la siguiente manera: En la sección II se presenta la metodología de registro y análisis de la señal. La sección III muestra los resultados obtenidos para la potencia en las diferentes condiciones. Se finaliza con la discusión de resultados y trabajo futuro.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Sujetos y condiciones de registro

Los registros EEG usados en este trabajo pertenecen a 15 sujetos sanos, entre ellos 7 mujeres y 8 hombres

todos mayores de 60 años. Las condiciones registradas son:

1. Registro de reposo: los sujetos con los ojos cerrados sin pensar nada en particular y monitoreados de manera continua para evitar que se duerman durante la adquisición.
2. Registro de codificación de información: Se presentan 50 imágenes, dos segundos por imagen, que los sujetos deben memorizar para una evaluación posterior.

Se registró la actividad procedente de 66 electrodos usando una frecuencia de muestreo de 1000 Hz siguiendo el sistema internacional 10-10. Todos los registros fueron realizados en un equipo SynAmps2 de NeuroScan. Los registros se efectuaron en un cuarto aislado, estando todos los sujetos sentados, despiertos, quietos y relajados. Un experto verificó que los sujetos permanecieran despiertos durante el registro y realizó una eliminación manual de segmentos de la señal afectados por artefactos.

Una vez adquirido el registro se realizó un pre-procesamiento que consistió en un filtrado pasa-banda de 0-50 Hz, una segmentación por épocas de 2 segundos, identificación y eliminación de artefactos musculares y oculares usando el método de Análisis de Componentes Independientes, y por último un submuestreo para obtener una frecuencia final de 128 Hz.

B. Descomposición wavelet

Se realizó una descomposición de 7 niveles a través de la familia de transformadas Daubechies de orden 4 ya que ha dado buenos resultados en estudios similares (7,8).

$$W_{\psi}[f](a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx$$

Para $f \in L^2(R)$, $a \in R^+$ y $b \in R$. Los parámetros a y b denotan escala y traducción / posición de la transformación

La descomposición de la señal en los siete niveles genera coeficientes con energía en los siguientes rangos: D1 entre 128 y 64 Hz; D2 entre 64 y 32 Hz; D3 entre 32 y 16 Hz; D4 entre 16 y 8 Hz; D5 entre 8 y 4 Hz; D6 entre 4 y 2 Hz; D7 entre 2 y 0 Hz. Dado que el componente D1 tiene la información fuera de la banda de paso del filtro usado en el preprocesamiento es descartado en los análisis siguientes.

C. Cuantificación de datos

Para cuantificar la información de los coeficientes wavelet, se suele calcular la potencia en cada escala de descomposición, y normalizarla respecto a la potencia total. De esta manera, para calcular la potencia en la escala j y la potencia total se aplicaría (4):

$$P[j]= \int_{k=1}^K y_j^2[k] \quad j=1,...,J \quad (2)$$

$$P_{total} = \prod_{j=1}^J P[j]P[j] \quad (3)$$

Y la potencia relativa para la escala j se obtendría (3):

$$P_r[j] = \frac{P[j]}{P_{total}} \quad j = 1, \dots, J \quad (4)$$

D. Parámetros y condiciones

En relación a la distribución topográfica de los electrodos (Figura 2), se decide definir las siguientes zonas de interés, con el fin de discernir luego el aporte en varianza de las bandas de frecuencia en cada una de ellas (9): frontal, temporal, central y parieto-occipital como se especifica en la tabla I.

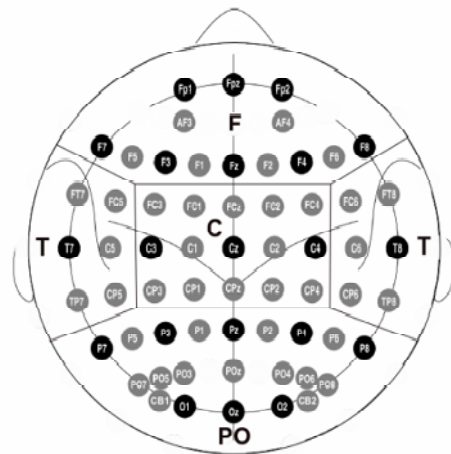


Figura. 2. Sistema 10-10 de electrodos para registro EEG con regiones corticales.

Esta definición de regiones de interés permite centrar el análisis de las bandas de frecuencia en regiones que tienen un interés desde el punto de vista anatómico.

E.Análisis estadístico

Para evaluar las diferencias entre las condiciones y entre los ritmos cerebrales se recurrió a un Análisis de Varianza (ANOVA) el cual permite comparar varias medidas de manera simultánea (10-11).

Se trabajó con el ANOVA de dos factores y se propuso la hipótesis de diferenciabilidad estadística bajo

TABLA I. ZONAS CEREBRALES Y SUS RESPECTIVOS ELECTRODOS

Región	Electrodos
Frontal	1-14
Temporal	15, 16, 22-25, 31,32,34,35,41,42
Central	17-21,26-30,36-40
Parieto-occipital	44-64

una probabilidad menor a 0.0001 (0.01%). Luego, para conocer el aporte en varianza de los ritmos cerebrales en cada zona de interés se realizó un análisis multi-comparativo de los resultados del ANOVA y por último se calculó el promedio de la potencia relativa de cada banda de frecuencia definida.

III. RESULTADOS

Se calculó la potencia total teniendo en cuenta los rangos de frecuencia de los ritmos cerebrales descritos para este trabajo, es importante tener en cuenta que para una relación del contenido de los coeficientes con el rango de las bandas de frecuencias, la resolución de datos es de 0.5Hz.

TABLA II. POTENCIA TOTAL DESDE LAS BANDAS PARA UNA REGIÓN DISCRIMINANDO LA CONDICIÓN.

	Temporal		
	Actividad	Reposo	
Promedio	7,85E-05	1,30E-03	Delta
	9,14E-05	6,97E-04	Theta
	5,33E-03	6,01E-03	Alfa1
	8,85E-03	5,55E-03	Alfa2
	3,23E-02	1,85E-02	Beta
	1,81E-02	1,33E-02	Gamma

La tabla II muestra el promedio del cálculo y la normalización de las potencias de sus respectivos coeficientes en los diferentes ritmos cerebrales discriminando la condición, mientras la figura 3 muestra el promedio de potencia por ritmo a lo largo de las regiones ya descritas y diferenciando a su vez la condición.

Con los datos de todos los sujetos se procedió a hacer un análisis ANOVA de dos factores, donde el primer factor corresponde a la condición y el segundo a los ritmos cerebrales. Se obtuvo para todas las regiones cerebrales $p < 0.0001$. De esta manera, la hipótesis de diferenciabilidad estadística se cumplió ampliamente para todas las regiones definidas.

Con un análisis multi-comparativo de los resultados

se observó el aporte en varianza de los ritmos, como lo muestra la figura

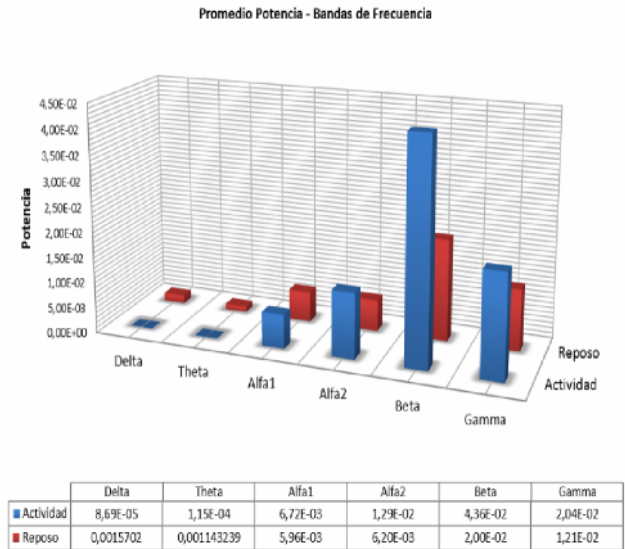


Figura. 3. Promedio de potencia para cada ritmo y condición a lo largo de las regiones.

En la figura 4 el eje horizontal corresponde a la magnitud de la varianza y el eje vertical muestra cada uno de los ritmos.

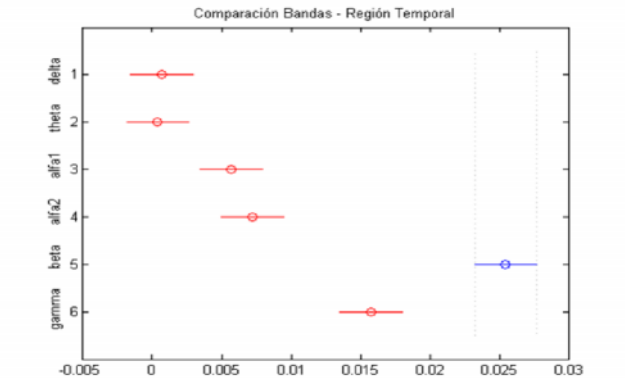


Figura. 4. Aporte de los ritmos en la región Temporal.

Para la región temporal se nota que el rango de magnitud para los ritmos δ y θ es aproximadamente el mismo, a diferencia de $\alpha 1$ y $\alpha 2$ que se desplazan un poco entre sí con un aporte mayor. Los ritmos γ y β se alejan considerablemente de los otros situando ambos rangos en valores de magnitud diferente, esto deja a β como el ritmo con mayor magnitud en varianza. Pero, a pesar de que el aporte de los ritmos cambia para cada región la relación descrita entre estos se mantiene de forma aproximada.

Los resultados anteriores muestran que existen diferencias entre las condiciones de registro. Dicho esto, se encontró que β tiene mayor aporte en la región parieto-occipital, mientras que δ y θ son las que menos

aportan con magnitudes muy cercanas a cero. Para la banda γ cuyo aporte en la región parieto-occipital es el segundo mayor mostró entrecruzamiento en las regiones frontal y central con la banda $\alpha 2$. Es posible notar que $\alpha 2$ es de mayor magnitud respecto a $\alpha 1$ y además, su aporte en las regiones: frontal y parieto-occipital se acerca a γ , por lo cual es posible que exista un acoplamiento entre ellas (12).

Las frecuencias δ y θ son mayores en estado de reposo en comparación con el estado de actividad (Figura 3), aun así, δ presenta mayor potencia que θ en ese estado; estos resultados están en concordancia con trabajos previos de EEG y memoria (13, 14).

Para la banda $\alpha 1$ en ambos estados la diferencia es mínima, pero presenta menor potencia que $\alpha 2$ sólo en estado de actividad, esto es lógico teniendo en cuenta que la banda α se atenúa al abrirse los ojos (15, 16). Se observa que la banda β posee la mayor potencia entre todos los estudios, y presenta un aumento muy significativo en el estado de actividad respecto al de reposo, lo cual corrobora los hallazgos previos donde se menciona la importancia de la banda en sujetos que realizan tareas mentales (17, 18).

Al observar la banda γ se identifica un incremento de potencia en actividad respecto al reposo, aunque no tan alto como en β , pero sigue siendo la banda con

el segundo mayor valor en potencia. Esto explica la activación de procesos de memoria y retención de información durante la captación de las señales (19, 20, 21).

IV. CONCLUSIONES

Existe una clara diferencia entre los estudios EEG obtenidos en reposo y en actividad como lo demuestra el análisis de varianza.

La metodología permite extraer características frecuenciales claves de los estudios EEG, además de poder analizar su variabilidad dentro de un mismo paciente y respecto a otros en condiciones similares. En base a los resultados obtenidos en este trabajo se propone a futuro analizar la variabilidad de pacientes sanos contra pacientes con Enfermedad de Alzheimer de manera que se puedan encontrar nuevos correlatos neurofisiológicos de la enfermedad.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se hizo posible gracias al apoyo del Grupo de Neurociencias de Antioquia (GNA) y al Grupo de Investigación en Bioinstrumentación e Ingeniería Clínica (GIBIC) de la Universidad de Antioquia, a UdeA-CODI por los recursos económicos en apoyo al proyecto “Identificación de marcadores preclínicos de la mutación E280A de la enfermedad de Alzheimer a partir de medidas de conectividad en EEG” identificado con el código PRG14-1-02.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ian A. Cook, Ruth O'Hara, Sebastian H.J. Uijtdehaage, Mark Mandelkern, Andrew F. Leuchter, Assessing the accuracy of topographic EEG mapping for determining local brain function, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 107, n° 6, pp. 408-414, 1998.
2. Rodrigo Quián Quiroga, “Quantitative analysis of EEG signals: Time-frequency methods and Chaos theory”. Institute of Physiology and Institute of Signal Processing Medical University Lubeck. 1998.
3. L. Espada, M. Sanjurjo, S Urréjola, E Bouzada, G. Rey y A Sánchez. “Ventajas del análisis Wavelet sobre el análisis de Fourier para la interpretación del ruido electroquímico”. *Rev. Metal. Madrid Vol. Extr.* (2003). pp 72-79.
4. Rangayyan, Rangaraj M., “Biomedical Signal Analysis” IEEE press, pp. 1-4, 28-30; Feb. 2002.
5. Figliola and E. Serrano, “Analysis of Physiological Time Series Using Wavelet Transforms”, *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, 16(3), pp. 74-79, May-Jun. 1997.
6. R. Polikar, F. Keinert, and M. H. Greer, “Wavelet analysis of ERPs for early diagnosis of Alzheimer's disease,” in “Wavelets in Signal and Image Analysis, From Theory to Practice” (ed. A. Petrosian and F.G. Meyer), Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 453-478.
7. R.J.E. Merry., “Wavelet Theory and Applications - A literature study.” DCT 2005.53; Eindhoven University of Technology. Department of Mechanical Engineering. Control Systems Technology Group. Eindhoven, June 7, 2005.

8. A. A. Petrosian, D. V. Prokhorov, W. Lajara-Nanson, and R. B. Schiffer., "Recurrent neural network-based approach for early recognition of Alzheimer's disease in EEG", *Clin. Neurophysiol.*, vol. 112, pp. 1378–1387, Aug. 2001.
9. G. Jacques, J. L. Frymiare, J. Kounios, C. Clark, and R. Polikar., "Multiresolution analysis for early diagnosis of Alzheimer's disease," in *Proc of 24th Int. Conf. of the IEEE/EMBS*, 2004, pp. 251–254.
10. Morillo, Luis E., "Análisis Visual Del Electroencefalograma". [Online] consultado el 15 de Febrero del 2014. pp. 145–152. Disponible en: <http://www.acnweb.org/guia/g7cap17.pdf>
11. Lars Støhler, Svante Wold., "Analysis of variance (ANOVA)." *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. November. 1989. [Online] consultado el 10 de Febrero del 2014. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0169743989800954?showall=true>
12. Wolfgang Klimesch, "EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: a review and analysis". *Department of Physiological Psychology, University of Salzburg, Hellbrunnerstr. Austria. Brain Research Reviews* 29 (1999). pp 169–195.
13. P. Sauseng, W. Klimesch, W. Gruber, M. Doppelmayr, W. Stadler, M. Schabus. "The interplay between theta and alpha oscillations in the human electroencephalogram reflects the transfer of information between memory systems". *Department of Physiological Psychology, University of Salzburg, Hellbrunnerstrasse, Austria. Neuroscience Letters* 324 (2002). pp 121–124
14. Patrick H. Khader, Kerstin Jost, Charan Ranganath, Frank Rösler. "Theta and alpha oscillations during working-memory maintenance predict successful long-term memory encoding". *Experimental and Biological Psychology, Philipps-University Marburg, Institute of Psychology, RWTH Aachen University, Germany. Center for Neuroscience and Dept. of Psychology, University of California, USA.*
15. Joshua Jacobs, Grace Hwang, Tim Curran, and Michael J. Kahanab, "EEG oscillations and recognition memory: Theta correlates of memory retrieval and decision making". *Neuroscience Graduate Group, University of Pennsylvania, Department of Psychology, University of Pennsylvania, Department of Psychology, University of Colorado at Boulder, USA. NeuroImage* 32 (2006). pp 978 – 987.
16. Wolfgang Klimesch, Roman Freunberger, Paul Sauseng, Walter Gruber. "A short review of slow phase synchronization and memory: Evidence for control processes in different memory systems?". *Department of Physiological Psychology, University of Salzburg, Austria. Brain Research* 1235 (2008). pp 31–44.
17. Gerd T. Waldhauser, Mikael Johansson, and Simon Hanslmayr. "Alpha/Beta Oscillations Indicate Inhibition of Interfering Visual Memories". *Department of Psychology, Lund University, 221 00 Lund, Sweden, and Department of Psychology and Zukunftscolleg, University of Konstanz, 78457 Konstanz, Germany. The Journal of Neuroscience*, 2012. pp 1953–1961.
18. Catherine Tallon-Baudry, Andreas Kreiter, And Olivier Bertrand. "Sustained and transient oscillatory responses in the gamma and beta bands in a visual short-term memory task in humans". *Institute for Brain Research, University of Bremen, Germany, Mental Processes and Brain Activation Laboratory, INSERM U280, Lyon, France. Visual Neuroscience* (1999). pp 449–459.
19. Daria Osipova, Atsuko Takashima, Robert Oostenveld, Guillén Fernández, Eric Maris, and Ole Jensen. "Theta and Gamma Oscillations Predict Encoding and Retrieval of Declarative Memory". *Donders Center for Cognitive Neuroimaging, The Netherlands, Department of Psychology, Cognitive Brain Research Unit, University of Helsinki, Finland. The Journal of Neuroscience*, 2006 (28). pp 7523–7531.
20. Uwe Frieze, Moritz Köster, Uwe Hassler, Ulla Martens, Nelson Trujillo-Barreto, Thomas Gruber. "Successful memory encoding is associated with increased cross-frequency coupling between frontal theta and posterior gamma oscillations in human scalp-recorded EEG". *University Medical Center Hamburg-Eppendorf, Department of Neurophysiology and Pathophysiology, Institute of Psychology, Institute of Cognitive Science, University of Osnabrueck, Germany. Cuban Neuroscience Center, Havana. NeuroImage* 66 (2013). pp 642–647.
21. Nikolai Axmacher, Florian Mormann, Guillen Fernández, Christian E. Elger, Juergen Fell. "Memory formation by neuronal synchronization". *Department of Epileptology, University of Bonn, Germany. Donders Centre for Cognitive Neuroimaging, The Netherlands. Brain Research Reviews* 52 (2006). pp 170–182.

PONDERACIÓN ÓPTIMA DE LAS ÁREAS EVALUADAS EN LA PRUEBAS SABER 11, PARA CALCULAR EL PUNTAJE DE INGRESO A LA UNIVERSIDAD

OPTIMAL WEIGHTING ON ASSESSED SUBJECT AREAS OF SABER 11 TEST TO COMPUTE THE ADMISSION SCORE

Hurtado T, L. H.¹; García G, M.D.²; López C, D.³

^{1,2} Grupo de Investigación y Asesoría en Estadística, Universidad del Quindío.

³ Maestría en Biomatemática, Universidad del Quindío.

Recibido: 15 Noviembre de 2015

Aceptado: 15 Diciembre de 2015

*Correspondencia del autor: E-mail: lhurtado@uniquindio.edu.co

RESUMEN

Las pruebas SABER 11 son utilizadas por muchas universidades colombianas como un mecanismo de selección de los estudiantes que aspiran a los diferentes programas académicos; para calcular el puntaje total de cada aspirante se adopta generalmente un esquema de ponderación donde los ponderadores de las diferentes áreas varían según la carrera. En este trabajo se desarrolla un método para calcular, en forma óptima, los ponderadores de las diferentes áreas contenidas en la prueba SABER 11, según la carrera, bajo la premisa de que el puntaje de ingreso debe estar relacionado con el rendimiento académico posterior del estudiante. Se hace una aplicación con datos reales por vía de ilustración.

Palabras claves: Matriz de correlaciones, Ponderación óptima, Multiplicadores de Lagrange, Pruebas SABER 11.

ABSTRACT

SABER11 are standardized tests used by many Colombian universities as a selection tool to admit first-year students at different academic programs. The total score for each applicant is generally calculated by a weighting scheme where a different weight is applied to each area in standardized test. These weights are chosen according to the academic program that the prospective student is applying to. This paper presents a method to calculate optimally the weights for each area in the SABER11 tests according to the academic program. The proposed method is based on the assumption that the admission score should be related to subsequent students academic performance. A validation with real data is also illustrated.

Keywords: Correlation Matrix, Lagrange Multipliers, optimal weighting, SABER11 standardized test.

1. INTRODUCCIÓN

Las pruebas SABER, en general, son uno de los mecanismos de que dispone el Estado para evaluar el Sistema Educativo en los diferentes ciclos. Las pruebas SABER 11, en particular, se han utilizado además por algunas universidades como mecanismo de selección de estudiantes, función que pasaron a cumplir heredada de las anteriores pruebas ICFES que a su vez reemplazaron las Pruebas de Estado.

Para su aplicación como mecanismo de selección de estudiantes, las pruebas SABER 11 son analizadas considerando separadamente los resultados en sus distintas áreas y utilizando un sistema de ponderación que le da un peso diferente a cada área dependiendo de la carrera a la cual el estudiante aspira.

El problema que surge es la forma como se construye el sistema de ponderación: ¿Cuál es su base científica?, ¿Las áreas que tienen mayor ponderación se supone que son garantía de rendimiento del estudiante en esa carrera?, ¿Como asignar un número a cada área que refleje su importancia en una determinada carrera y que tan diferente puede ser ese número del que se asigna a otra área para la misma carrera?. Generalmente estos interrogantes han sido resueltos en forma intuitiva por los administradores de los programas académicos, muy seguramente a través de consensos en los Consejos Curriculares o en los Consejos de Facultad de las universidades.

Lo que se propone entonces es la construcción de un sistema de ponderación, con base científica, el cual garantice que el puntaje global asignado al aspirante al ingresar a una carrera, a través de una combinación lineal de las diferentes áreas de la prueba SABER 11, tenga máxima correlación con el rendimiento académico posterior de ese estudiante. El sistema de ponderación así construido es óptimo en el sentido de maximizar la correlación entre los puntajes de ingreso con los rendimientos académicos de los estudiantes. En términos de Matemáticas el problema se reduce a encontrar un vector que maximice una función de dominio en un espacio vectorial y con imagen en los números reales. Las componentes del vector así encontrado, luego de ser normalizado, son los ponderadores de las diferentes áreas contenidas en la Prueba SABER 11.

La estimación del vector de ponderación, para una determinada carrera, se puede obtener de una muestra de estudiantes a los cuales se les registra información sobre los puntajes en la prueba SABER 11, en sus diferentes áreas, en el momento de su ingreso además de su puntaje promedio acumulado hasta el semestre que se hace la aplicación. Por vía de ilustración se incluye la aplicación al cálculo del vector de ponderación para el Programa de Medicina en la Universidad del Quindío.

2. CONSTRUCCIÓN DE PONDERADORES

Consideremos un vector $\mathbf{X}_{5 \times 1}$ que tiene como componentes los puntajes obtenidos por un estudiante en las cinco (5) diferentes áreas de la prueba SABER 11: Lectura Crítica, Matemáticas, Ciencias Naturales, Ciencias Sociales e Inglés; también un vector $\mathbf{Y}_{1 \times 1}$, con una única componente, que es el puntaje promedio acumulado obtenido por el estudiante en un determinado programa de una universidad, es decir

$$\mathbf{X}^T = (X_1, X_2, \dots, X_5) \text{ y } \mathbf{Y} = (Y).$$

La matriz de covarianza de X y Y tiene la forma:

$$Cov(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{15} & \sigma_{1y} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{25} & \sigma_{2y} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{51} & \sigma_{52} & \cdots & \sigma_{55} & \sigma_{5y} \\ \hline \sigma_{y1} & \sigma_{y2} & \cdots & \sigma_{y5} & \sigma_{yy} \end{pmatrix}$$

y puede ser particionada en cuatro submatrices, según las líneas dobles, así que puede escribirse como

$$Cov(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \begin{pmatrix} S_{XX} & S_{XY} \\ S_{YX} & S_{YY} \end{pmatrix}$$

Donde

$$S_{XX} = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{15} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{51} & v_{52} & \cdots & v_{55} \end{pmatrix};$$

$$S_{XY} = S_{YX}^T = \begin{pmatrix} v_{1y} \\ v_{2y} \\ g \\ v_{5y} \end{pmatrix};$$

$$S_{YX} = (v_{y1} \ v_{y2} \ g \ v_{y5});$$

$$y \quad S_{YY} = (v_{yy}).$$

Se tiene además un vector $a_{5 \times 1}$ con $a_i \in \mathbb{R}^+$ para $i = 1, 2, \dots, 5$, donde $\sum_{i=1}^5 a_i = 1$ y un escalar $b \in \mathbb{R}^+$. [5]

El producto punto $a^T X$ corresponde al puntaje de ingreso a la universidad y el problema de la ponderación óptima se convierte en encontrar un vector a tal que la correlación entre $a^T X$ y bY sea máxima, esto es, el problema se convierte en resolver para el vector a

$$\begin{aligned} \max_a Cqrr(a^T X, bY) \\ \max_a &= \frac{Cqv(a^T X, bY)}{[\text{Var}(a^T X) \text{Var}(bY)]^{\frac{1}{2}}} \\ &= \max_a \frac{a^T S_{XY} b}{[(a^T S_{XX} a)(b S_{YY} b)]^{\frac{1}{2}}} \end{aligned}$$

Una de las posibles soluciones, por la vía del cálculo, se logra utilizando los multiplicadores de Lagrange, estableciendo las siguientes restricciones [1]

$$a^T S_{XX} a = 1 \quad y$$

$$b S_{YY} b = b^2 S_Y^2 = 1$$

lo cual convierte el problema en maximizar para el vector a , la función

$$f(a, b) = a^T S_{XY} b - \frac{\lambda}{2} (a^T S_{XX} a - 1) - \frac{\mu}{2} (b^2 S_Y^2 - 1)$$

Los puntos críticos de esta función se obtienen de resolver el sistema [3]

$$\frac{\partial f(a, b)}{\partial a} = a^T S_{XY} - \mu b S_{YY} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial f(a, b)}{\partial b} = S_{XY} b - \lambda S_{XX} a = 0. \quad (2)$$

Multiplicando ahora la ecuación (1) a la derecha por b y la ecuación (2) a la izquierda por a^T se tiene el sistema

$$a^T S_{XY} b - \mu b S_{YY} b = 0$$

$$a^T S_{XY} b - \lambda a^T S_{XX} a = 0$$

a partir del cual, teniendo en cuenta las restricciones y simplificando, se llega a que

$$\lambda = \mu = a^T S_{XY} b \quad (3)$$

y reemplazando λ por μ en la ecuación (2) se tiene que

$$S_{XY} b = \mu S_{XX} a.$$

Los términos de la ecuación (1) son escalares así que la ecuación puede escribirse también como [2]

$$S_{YX} a - \mu S_{YY} b = 0$$

y multiplicando esta última ecuación a la izquierda por $S_{XY} S_{YY}^{-1}$ se tiene

$$S_{XY} S_{YY}^{-1} S_{XY} a - \mu S_{XY} S_{YY}^{-1} S_{YY} b = 0$$

que luego de hacer los reemplazos y las simplificaciones correspondientes se convierte en

$$S_{XY} S_{YY}^{-1} S_{YX} a - \mu^2 S_{XX} a = 0$$

lo cual puede escribirse como

$$(S_{XY} V_Y^2 S_{YX} - \mu^2 S_{XX}) a = 0$$

o también

$$(S_{XX}^{-1} S_{XY} S_{YX} - \mu^2 I) a = 0;$$

ya que la variable Y puede estandarizarse de tal manera que $V_Y^2 = 1$. [5]

El problema se reduce entonces a hallar los valores propios μ^2 de la matriz

$$S_{XX}^{-1} S_{XY} S_{YX}$$

y según la ecuación (3) el valor de μ está asociado a la covarianza entre el puntaje de ingreso y el rendimiento académico, por lo tanto el vector propio correspon-

diente al mayor valor propio, una vez normalizado, es el vector que hace maxima la asociación entre el puntaje de ingreso y el rendimiento académico, esto es el vector de ponderación óptima.

3. ESTIMACIÓN DEL VECTOR $\mathbf{a}$

En la actualidad el ICFES, por medio de la Resolución 000503 de julio 22 del 2014, [4] ha establecido cinco (5) áreas de la Prueba SABER 11 a partir de las cuales calcula un puntaje global a cada estudiante que presenta la prueba; en el momento las áreas a considerar para el puntaje global son: Lectura Crítica (LEC), Matematicas (MAT), Ciencias Naturales (NAT), Ciencias Sociales y competencias ciudadanas (SOC) e Inglés (ING). Este puntaje global tiene, como uno de sus propositos establecer una ordenación descendente que permita seleccionar los estudiantes que serían acreedores a algunos de los estímulos que ofrece el gobierno nacional; las mismas áreas escogidas para el cálculo del puntaje global se pueden considerar para calcular el puntaje de ingreso, pero con una ponderación que tenga relación con la carrera a la cual se aspira a ingresar.

La estimación del vector $\mathbf{a}$, para un programa académico, se puede entonces conseguir a partir de una muestra de estudiantes del Programa, que tenga registrada información sobre los puntajes obtenidos en cada una de las áreas de la prueba SABER 11 con que hicieron su ingreso a la universidad y su puntaje promedio acumulado (PRO) en el momento en que se hace el estudio.

4. APLICACIÓN

Con el propósito de ilustrar el procedimiento anterior, se presenta una aplicación con la información de los estudiantes que ingresaron al programa de Medicina de la Universidad del Quindío en 2009.

En las primeras cinco columnas de la Tabla 1 aparecen los resultados de las pruebas SABER11 en las diferentes áreas, y en la última columna aparece el puntaje promedio acumulado de las materias cursadas por el estudiante.

Tabla 1. Notas estudiantes de Medicina 2009

LEC	MAT	NAT	SOC	ING	PRO
56,42	64,43	65,55	53,94	51,16	3,8
66,34	64,43	66,55	32,21	49,43	4,1
59,83	53,45	59,66	48,35	25,75	3,8
55,38	57,98	65,96	38,29	43,4	4
64,56	57,98	63,66	52,27	67,36	3,6
58,68	56,55	65,93	53,16	58,32	3,6
56,21	67,33	59,57	53,18	64,54	4,1
56,21	60,24	66,3	54,12	57,91	3,6
62,32	51,21	73,87	53,96	67,69	4,1
52,07	53,92	63,63	54,02	67,69	4
58,91	56,55	60,26	54,93	64,89	4,2
55,33	61,77	65,7	52,98	67,69	4
58,36	67,33	62,87	50,3	54,19	4,2
55,7	69,93	61,17	53,17	50,67	4,2
61,12	51,11	59,17	45,45	56,01	4,1
60,01	48,67	62,35	48,02	59,92	3,6
66,47	75,91	65,21	40,54	45,31	4,1
61,89	60,24	65,39	51,28	59,92	4,1
61,33	72,76	64,5	53,18	67,36	4
58,93	75,91	61,31	43,39	56,01	4,1
50,52	53,45	69,32	43,66	56,01	4,2
53,28	51,11	67,3	48,45	48,92	3,8
62,3	70,07	64,13	53,94	75,67	4,1
56,55	53,92	65,85	60,85	71,1	3,8

La matriz de varianzas y covarianzas $S_{x,y}$ construida con los datos de la Tabla 1 o la matriz de correlaciones, porque las variables han sido estandarizadas, se muestra a continuación.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0,24 & 0,01 & -0,2 & 0,4 & -0,24 \\ 0,24 & 1 & -0,13 & -0,05 & 0,06 & 0,35 \\ 0,01 & -0,13 & 1 & -0,03 & 0,26 & -0,08 \\ -0,2 & -0,05 & -0,03 & 1 & 0,48 & -0,24 \\ 0,04 & 0,06 & 0,26 & 0,48 & 1 & 0 \\ -0,024 & 0,35 & -0,08 & -0,24 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A partir de esta matriz se identifica la matriz de correlaciones de las áreas evaluadas en la prueba SABER 11.

$$S_{XX} = R_{XX} = \begin{pmatrix} 1 & 0,24 & 0,001 & -0,2 & 0,04 \\ 0,24 & 1 & -0,13 & -0,05 & 0,06 \\ 0,01 & -0,13 & 1 & -0,03 & 0,26 \\ -0,2 & -0,05 & -0,03 & 1 & 0,48 \\ 0,04 & 0,06 & 0,26 & 0,48 & 1 \end{pmatrix}$$

cuya matriz inversa es

$$S_{XX}^{-1} = R_{XX}^{-1} = \begin{pmatrix} 1,124 & -0,242 & 0,012 & 0,296 & -0,176 \\ -0,242 & 1,094 & 0,184 & 0,079 & -0,142 \\ 0,012 & 0,184 & 1,143 & 0,252 & -0,429 \\ 0,296 & 0,079 & 0,252 & 1,443 & -0,775 \\ -0,176 & -0,142 & -0,429 & -0,775 & 1,499 \end{pmatrix}$$

también de la Tabla 1 se obtiene la matriz de covarianza

$$S_{XY} = R_{XY} = \begin{pmatrix} -0,24 \\ 0,35 \\ -0,08 \\ -0,24 \\ 0,00005 \end{pmatrix}$$

además

$$S_{YY} = S_Y^2 = 1.$$

Al realizar el producto

$$S_{XX}^{-1} S_{XY} S_{YX}$$

se obtiene la matriz

$$S_{XX}^{-1} S_{XY} S_{YX} = \begin{pmatrix} 0,102 & -0,149 & 0,041 & 0,102 & -0,00002 \\ -0,097 & 0,142 & -0,032 & -0,098 & 0,00002 \\ 0,021 & -0,031 & 0,0072 & 0,021 & -0,000004 \\ 0,098 & -0,143 & 0,033 & 0,098 & -0,00002 \\ -0,05 & 0,074 & -0,017 & -0,051 & 0,00001 \end{pmatrix}$$

cuyo valor propio máximo es 0,56626 y su correspondiente vector propio es

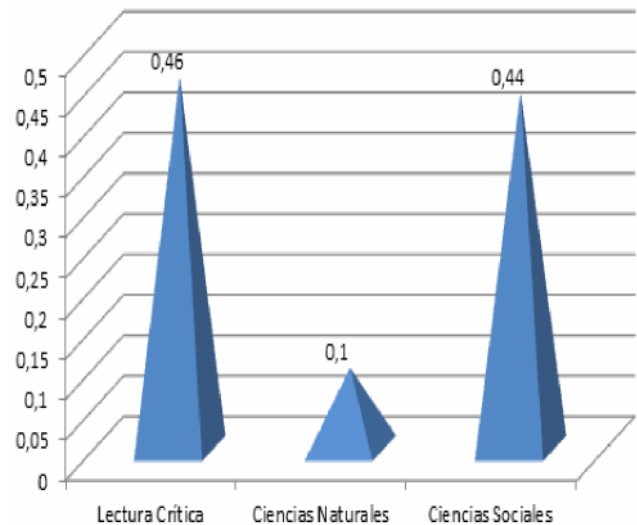
$$\begin{pmatrix} 0,5656 \\ -0,5390 \\ 0,1192 \\ 0,5421 \\ -0,2829 \end{pmatrix}.$$

Como se puede observar, hay dos áreas que no aportan positivamente al puntaje total; haciendo entonces un proceso de depuración, donde se elimina primero una de las áreas y luego la otra, se llega a que las áreas de la prueba SABER 11 que aportan positivamente al rendimiento académico de los estudiantes de Medicina son: Lectura crítica, Ciencias naturales y Ciencias sociales.

Las componentes del vector propio que se obtienen se muestran en la segunda columna de la Tabla 2 y en la tercera columna aparece la ponderación normalizada. La ponderación óptima produce una correlación del 59,24 % con el rendimiento académico (obtenida de la raíz cuadrada del mayor valor propio que resulta cuando el análisis se reduce a las tres áreas mencionadas) y en este caso es 0,351. Las componentes del vector propio se muestran en la segunda columna de la Tabla 2 y en la tercera columna la ponderación normalizada

Tabla 2. Ponderación de las áreas

Area del conocimiento	Vector propio	Ponderadores normalizados
Lectura crítica	0,565	0,46
Ciencias Naturales	0,11	0,10
Ciencias Sociales	0,542	0,44



En la figura 1 se muestra el vector propio normalizado, donde aparecen los ponderadores de las áreas que finalmente permiten optimizar la selección de los estudiantes de medicina.

5. CONCLUSIÓN

La utilización de las pruebas SABER 11 como mecanismo para la selección de estudiantes a los programas académicos de Educación Superior, debe acompañarse de un esquema de ponderación óptimo para las diferentes áreas que contiene la prueba, de tal forma que exista una correlación positiva entre los puntajes de ingreso y el rendimiento académico de los estudiantes; así se garantiza que el mecanismo utilizado sea realmente de selección mas que una herramienta de exclusión.

De todas formas, aún utilizando un esquema de ponderación óptimo, con la selección de los estudiantes a partir de la prueba SABER 11 se pueden presentar situaciones donde los puntajes de selección no muestren correlación con el rendimiento de los estudiantes seleccionados, lo cual es fácilmente explicable si se piensa que las pruebas SABER 11 han sido diseñadas mas para evaluar el Sistema Educativo en el ciclo de secundaria que para seleccionar estudiantes en su ingreso a la Educación Superior.

BIBLIOGRAFÍA

1. Apostol, T. Análisis Matemático. Addison Wesley. 1957.
2. Asmar, Abraham. Tópicos en Teoría de Matrices. 1995.
3. Bartle, R. The Elements of Real Analysis. Second Edition. Wiley. 1976.
4. Instituto Colombiano para la evaluación de la Educación, ICFES, Resolución N. 000503 de julio 22, 2014.
5. Díaz, Luis. Estadística Multivariada: Inferencia y Métodos. Panamericana Formas e Impresos S.A. 2002.

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF THERMAL AND CHEMICAL MICROALGAE CELL DISRUPTION METHODS FOR BIOFUELS AND BIOPRODUCTS PRODUCTION

DESARROLLO Y EVALUACION DE METODOS DE DISRUPCION CELULAR TERMICA Y QUIMICA PARA LA OBTENCION DE BIOCOMBUSTIBLES Y BIOPRODUCTOS

Angel González Delgado¹, Yeimmy Yolima Peralta Ruiz², Viatcheslav Kafarov³

¹. Doctor in Chemical Engineering, University of Cartagena, Avenida del Consulado # Calle 30 No. 48 – 152, Cartagena de Indias, Colombia, E-mail: agonzalezdl@unicartagena.edu.co

². Master in Chemical Engineering, Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, E-mail: yeimmy.peralta@unad.edu.co

³. Doctor Ingeniero habil, Center for sustainable Development in Industry and Energy, Industrial University of Santander, Cra 27 Cl 9 Ciudad Universitaria, Bucaramanga, Colombia, E-mail: cisyc@uis.edu.co

Recibido: 03 Diciembre de 2015

Aceptado: 22 Diciembre de 2015

*Correspondencia del autor: E-mail: agonzalezdl@unicartagena.edu.co

RESUMEN

La biomasa de microalgas continúa siendo objeto de estudio como candidata promisoría para la obtención de biocombustibles y bioproductos, sin embargo, los procesos de aprovechamiento de microalgas enfrentan cuellos de botella técnicos relacionados con la eficiencia de extracción y transformación de metabolitos. Este artículo muestra el desarrollo y la evaluación de métodos térmicos y químicos para la extracción de aceite de *Nannochloropsis* sp. como materia prima para la producción de biocombustibles de tercera generación y ácidos grasos de alto valor agregado. El proceso de disrupción celular térmica elegido fue autoclave, durante tiempos de operación de 1 y 3 horas a 394.15 K y 103410 Pa. El tratamiento químico se basa en la hidrólisis ácida con HCl en concentraciones de 0.1, 0.5, 1 y 3 mol L⁻¹. Además, se utilizó el pretratamiento Organosolv con un tiempo de reacción de 4.1 horas a 394.15 K y 103410 Pa. Los resultados mostraron que el proceso de disrupción celular térmica y Organosolv aumenta los rendimientos de extracción de la biomasa sin pretratamiento, pero éstos no exceden cualquiera de los resultados obtenidos mediante hidrólisis ácida. La solución de HCl 0.5 mol L⁻¹ demostró ser la más adecuada para el proceso de ruptura celular. Además se determinó que el contenido de agua en la biomasa pretratada, disminuye la eficiencia en los procesos de extracción.

Palabras claves: Microalgas, disrupción celular, extracción, extracto lipídico.

ABSTRACT

Biomass of microalgae continues under study as promising candidate for novel biofuels and bioproducts, however, microalgae-based processes faces technical bottlenecks related to efficiency of metabolite extraction and transformation. This paper shows the development and evaluation of thermal and chemical cell disruption methods for the extraction of oil from *Nannochloropsis* sp. as feedstock for the production of third generation biofuels and high value fatty acids, in order to achieve lipid extraction efficiency. The thermal cell disruption process chosen was autoclave, during operation times of 1 and 3 hours at 394.15 K and 103410 Pa. Chemical treatment was based on acid hydrolysis with HCl in concentrations of 0.1, 0.5, 1 and 3 mol L⁻¹. Organosolv Pretreatment was also used with a reaction time of 4.1 hours at 394.15 K and 103410 Pa. Results showed that the thermal and Organosolv cell disruption process increases extraction yields for biomass without pretreatment, but these did not exceed any of the results obtained with acid hydrolysis. Solution 0.5 mol L⁻¹ HCl proved to be the most suitable for cell disruption process. In addition it was determined that the water content in the pretreated biomass, decreases the efficiency of the extraction processes.

Keywords: Microalgae, cell disruption, extraction, lipid extracts.

1. INTRODUCTION

The increasing oil prices and environmental problems arising from the use of fossil fuels, urgently demanding alternative sources of energy to be a promising option for biofuels. They offer many benefits related to energy security, economic stability and reducing the environmental impact caused by greenhouse gases (1).

The first-generation biofuels derived from crops such as sugarcane land, sugar beets, corn, soy etc., leads to a tremendous strain on global food markets. The second generation produced from biomass feedstock, faces the above problems, but there is great concern about competition in land use and changes to it. Therefore, based on current scientific knowledge and technology projections, third-generation biofuels, specifically derived from microorganisms, are considered as a viable energy resource that has no major problems associated with the first and second generation biofuels (2).

The use of microalgae for biodiesel production is an advantageous alternative because of the high lipid content and fatty acid profile that suitable offers. In addition, other attributes of microalgae are its high photosynthetic efficiency, its ability to grow in marine waters, sweet, and brackish waste and its relatively high growth rate (3). However, the production of biodiesel from microalgae has certain limitations related to the paucity of information for scaling up,

high operating costs and standardization of methods for efficient extraction (4).

Against this background and in the framework of the "Bioprospecting Colombian microalgae for biodiesel production", authors proposed the development of a laboratory-scale method for extracting lipids from microalgae, making a comparative study of the processes of thermal and chemical cell disruption.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Raw material

The biomass was provided by the Institute Morrosquillo (Punta Bolivar, Colombia) under the codes IM20091203 and IM20091228-01-11 for the genera *Nannochloropsis* sp., and a mixture of *Navicula* sp. / *Scenedesmus* sp. grown in open ponds in enriched medium sea water, harvested by flocculation (150 ppm FeCl₃) and sun dried.

2.2 Preliminary tests

Preliminary tests were performed using a mixture of the genera *Navicula* sp. and *Scenedesmus* sp., in order to establish qualitatively the effect caused by chemical agents on cells. 5 g of sample were deposited into 4 glass containers. Each container was added 100 mL of 0.5 mol L⁻¹ NaOH, 0.5 mol L⁻¹ HCl, analytical grade chloroform and hexane and were subjected to autoclave for 1 hour at 394.15 K and 103410 Pa. Aliquots were taken from each container and were observed under light microscopy at 100X. In addition, samples were taken of the mixture, which was not subjected to

any treatment (control). Parallel tests were performed lipid extraction with wet and dry biomass, to establish the effect of moisture content in the extraction yield. The methodology used corresponds to Figure 2.

2.3 Pretreatment of biomass

2.3.1 Cell Disruption

Figure 1 summarizes the processes for cell disruption

performed on the microalgae of the genera *Nannochloropsis* sp. Biomass was previously crushed and dried at 378.15 K for 4 hours. Subsequently, it was exposed to three cell disruption processes separately: Thermal, chemical and Organosolv (methanol / acid). Two replicates were conducted for each experiment.

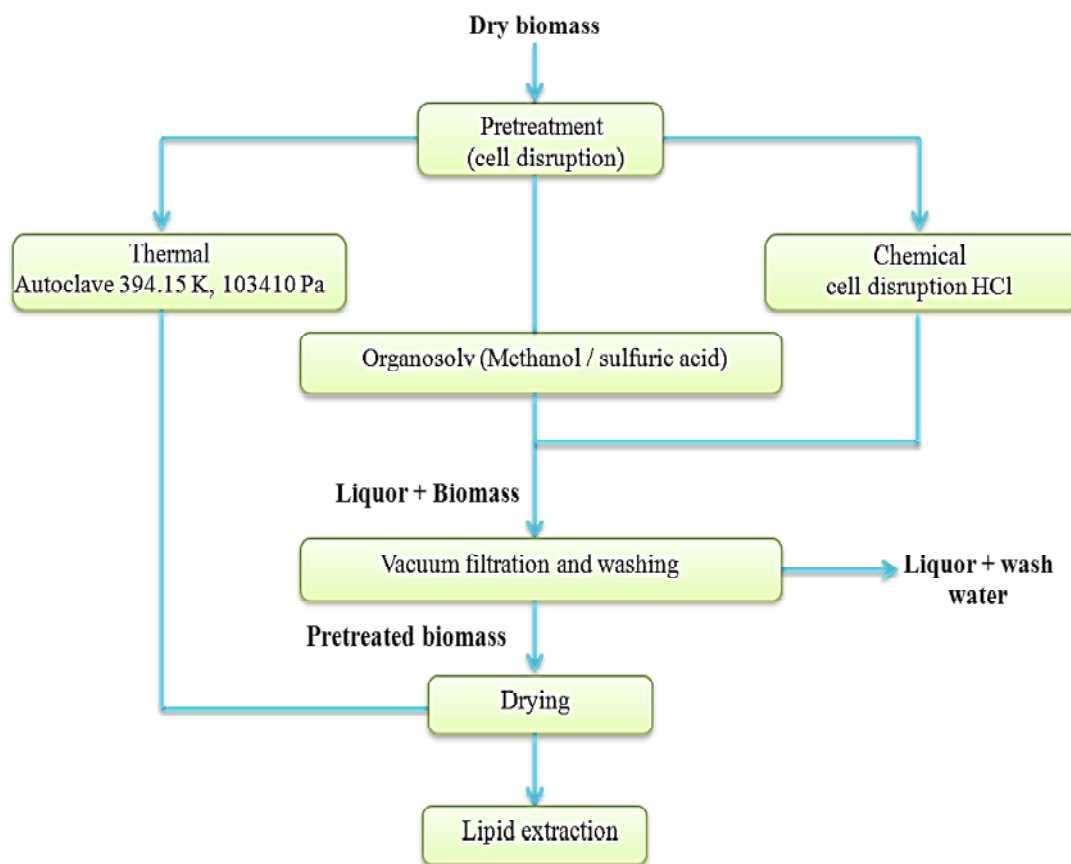


Figure 1. Processes for cell disruption.

2.3.2 Thermal cell disruption

3 g of biomass were underwent to a process of cell disruption thermal in electric sterilizer autoclave to 394.15 K and 103410 Pa during a time of 1 h and 3 h.

2.3.3 Chemical cell disruption

3 g of hydrolyzed biomass with different HCl solutions at concentrations of 0.1 mol L⁻¹, 0.5 mol L⁻¹, 1 mol L⁻¹ and 3 mol L⁻¹ with an exposure time of 0.5 hours with magnetic stirring at room temperature.

2.3.4 Organosolv Methanol/Acid

Organosolv Methanol-acid pretreatment proposed for obtaining reducing sugars (5) was applied parallel

with the following condiones: 3.32 % v/v methanol and 0.6 mol L⁻¹ H₂SO₄ solution and a reaction time of 4.1 h at 394.15 K and 103410 Pa.

2.4 Filtering, washing and drying of pretreated biomass

After the pretreatment, the biomass was separated from the liquor by vacuum filtration. Separate biomass was washed with distilled water and dried in oven at 378.15 K for 4 hours. Subsequently, continued the extraction step.

2.5 Lipid extraction and quantification

Lipid extraction was performed according to each pre-

treatment applied to the biomass of the genera *Nannochloropsis* sp., with the aim to propose a comparative study between them and determine the most effective. The lipid extraction and purification was based on the methodology proposed by Ramírez Fajardo *et al.* (2007), using ethanol and hexane as solvents for ex-

traction and purification (6). Figure 2 illustrates the method used. The quantification of lipid extract was determined with the aim of evaluating the performance of the process and obtains an indirect measure of the effect caused by pretreatment of cells.

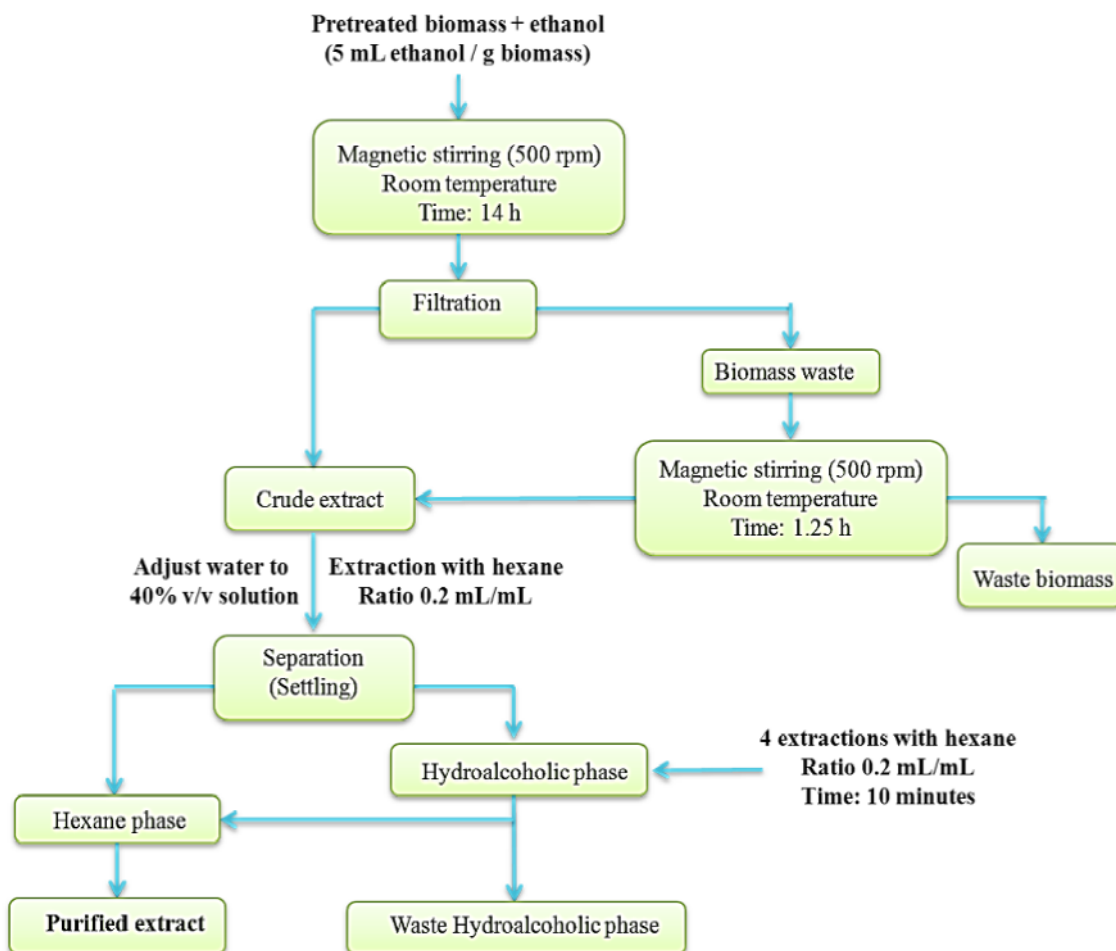


Figure 2. Lipid extraction based on the methodology proposed by Ramírez Fajardo, *et al.* (2007).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The chemical composition of the microalga *Nannochloropsis* sp., reported by the Colombian Petroleum Institute (ICP) is shown in Table 1. *Nannochloropsis* sp. had a higher proportion of protein, this biomolecule was found at a concentration of 21.2% w/w, followed by lipids. The large amount of ashes reported were caused by the effect of flocculant.

Table 1. Chemical composition of the microalga *Nannochloropsis* sp.

Microalgae	Protein / % w/w	Carbohydrates / % w/w	Lipids / % w/w	Ash / % w/w
<i>Nannochloropsis</i> sp.	21.1	3.3	11.2	57.5

3.1 Preliminary tests

Figure 4 shows the changes caused by treatment with chloroform, hexane, sodium hydroxide and hydrochloric acid on the cells of *Navicula* sp. and *Scenedesmus* sp, which are observed as untreated cells in Figure 3.

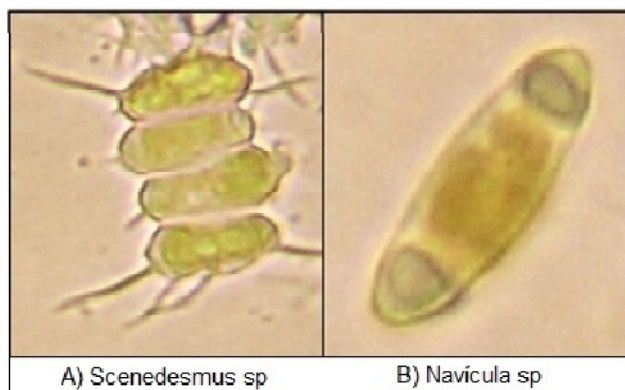


Figure 3. Untreated cells of *Navicula* sp. and *Scenedesmus* sp.

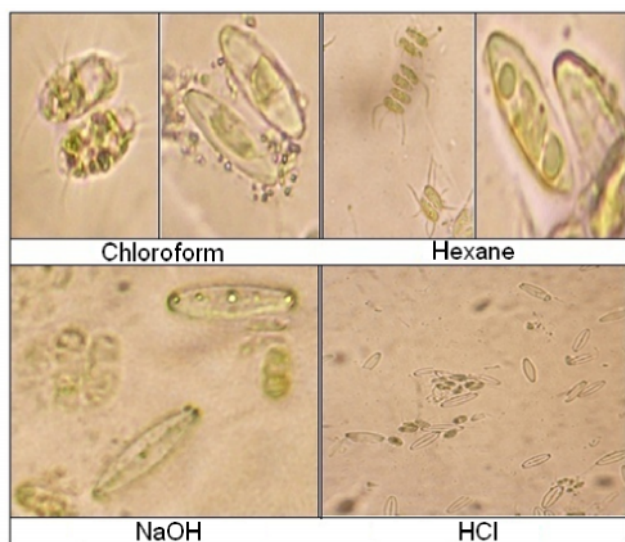


Figure 4. Changes in cells of *Navicula* sp. and *Scenedesmus* sp caused by different reagents.

Changes on cells in the treatment with hexane and chloroform were observed as a difference in coloration and deformation of the internal structure. Although chloroform promoted the release of intracellular content in the genera *Navicula* sp., morphological changes and leaflets were not evident in any of the two treatments. According to this, Dos Santos, *et al.* (2015), explain that when a microalga cell is exposed to a non-polar organic solvent, such as hexane and chloroform, the solvent penetrates the cell membrane and interacts with neutral lipids (i.e., triglycerides) present in the cytoplasm because of van der Waals forces, to form an organic solvent-neutral lipid complex,

which diffuses across the cell membrane and the static organic solvent film surrounding the cell, entering the organic solvent. As a result, the neutral lipids are extracted from the cells and remain dissolved in the non-polar organic solvent (7).

Even though these changes demonstrate the permeation of solvent through the cell wall, do not guarantee release a large proportion of intracellular products desired because the Van der Waals interactions formed between non-polar organic solvents and neutral lipids are inadequate to disrupt the membrane-based lipid-protein associations (these last ones are formed when some neutral lipids found in the cytoplasm as a complex with polar lipids - i.e., phospholipids, glycolipids, sterols, carotenoids-, are strongly linked via hydrogen bonds to proteins in the cell membrane), making it necessary to use a polar organic solvent, such as methanol or ethanol (7).

On the other hand, the treatment with hydrochloric acid affected morphologically some cells, mainly of the genera *Navicula* sp., causing the breakdown of cellular leaflet. Changes were presented as to the disposition of the dispersed colonies and the coloration, and release the intracellular content of spiny projections gender *Scenedesmus* sp. In the study reported by Miranda, *et al.* (2012), where the response variable was the total amount of sugars extracted from *Scenedesmus Obliquus*, the acid pre-treatment method (HCl and H₂SO₄) revealed to be the best for disruption/sugar extraction for both dried and wet biomass (8). The changes in cells are caused by acid hydrolysis related to polysaccharides that make up the cell wall and decomposition of siliceous material, which consist the shells of diatoms.

Finally, the damage caused by sodium hydroxide is between those caused by acid and organic solvents. There were changes in color and morphology of the cells, but did not show drastic effects on the cell walls of microalgae. Günerken, *et al.* (2015) explain this might occurs because bases saponify the membrane lipids while acids lead to poration of the cell membrane/wall (9).

According to the qualitative results obtained and knowledge of the cell wall is a limiting factor in the lipid extraction, was decided to use hydrochloric acid as an agent for chemical cell disruption processes, since the effects were more evident with the treatment

and mainly on the genera *Navicula* sp.

3.2 Influence of moisture in biomass lipid extraction

Table 2 shows the yields obtained from the lipid extraction process using wet and dry biomass. These tests were performed with a mixture of *Navicula* sp.

and *Scenedesmus* sp. The disruption of the cell wall is specific for each species of microalga, as each has a particular cell wall which may confer more or less resistance to mechanical and chemical stress. It is probable that the drying process improves cell disruption by weakening the cell wall, which thereby improves the lipid extraction yield (8).

Table 2. Data on the influence of moisture on the extraction of lipids.

Pretreatment	*Wet basis/g	Dry basis/g	Average extracts/g	Standard deviation	Y / % w/w	L / % w/w
Wet	10	2.26	0.0337	0.0028	1.49	30.8
Dry	0	2.26	0.0629	0.0033	2.8	9.36

* 77.4% w/w moisture; Y: dry basis yield biomass; L: losses

Figure 5 compares the yields obtained with wet and dry sample. It is shown that the water content in the sample is not favorable for the extraction of lipids due to two reasons.

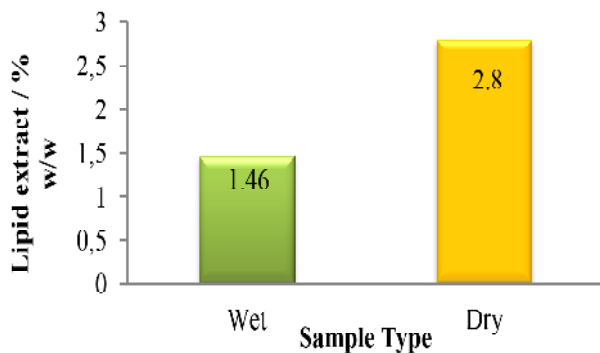


Figure 5. Extraction yields of wet and dry biomass.

First, the presence of water in the sample decreases the concentration of ethanol in the biomass / solvent mixture during the first stage of the process, reducing the efficiency of solvent extraction of crude oil. From the above table, it is shown that 10 g of wet biomass containing 7.74 g of water. This causes a decrease of 40% w/w ethanol concentration, which decreases its extractive capacity.

Secondly, reported losses reflect the presence of moisture in the sample handling difficulties, mainly due

to the adhesion of biomass to the elements and utensils used during each stage of the process. This is an untoward occurrence, since a fraction of the biomass would not be exploited for the extraction of lipids.

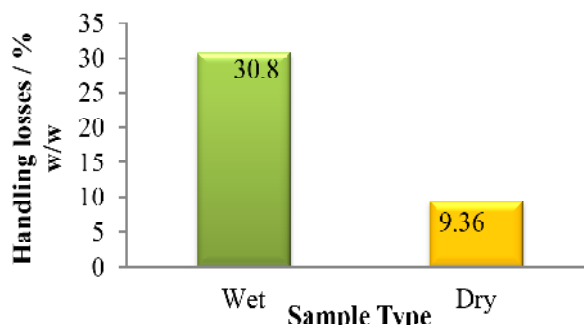


Figure 6. Losses due to handling with wet and dry biomass.

3.3 Effect of autoclaving time

The thermal pretreatment results are shown in Table 3. Although this process of cell disruption showed a significant increase in biomass without pretreat the recovery rate of lipids in a time of 3 hours (Figure 7), failed to overcome any of the results obtained with the other pretreatments. This might have occurred because thermal pretreatment damages cell walls but not rupture cells (10). The recovery percentages for autoclave worked times do not differ by more than 1.2% w/w despite increased exposure time to 2 hours.

Table 3. Data obtained from Autoclave Pretreatment.

Pretreatment	Average extracts/ g	Standard deviation	LR / % w/w	Y / % w/w
Autoclave / 1h	0.0168	0.0004	4.9	9.46
Autoclave / 3h	0.0206	0.0015	6.07	9.35
Control	0.0098	0.0014	2.85	9.58

LR: % w/w lipid recovery in the total biomass; Y: Losses of biomass through handling.

This allows us to infer that time worked above the maximum operation, represent a large and unnecessary energy expenditure.

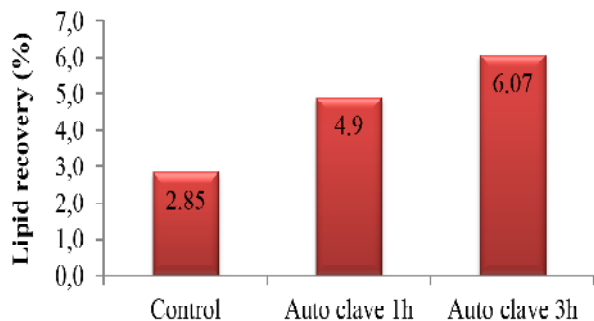


Figure 7. Effect of autoclave time on the recovery rate of lipids.

3.4 Effect of HCl concentration

We evaluated the effects of hydrochloric acid concentration on the extraction yield 0.1 mol L⁻¹, 0.5 mol L⁻¹, 1 mol L⁻¹ and 3 mol L⁻¹ (Table 4). According to Figure

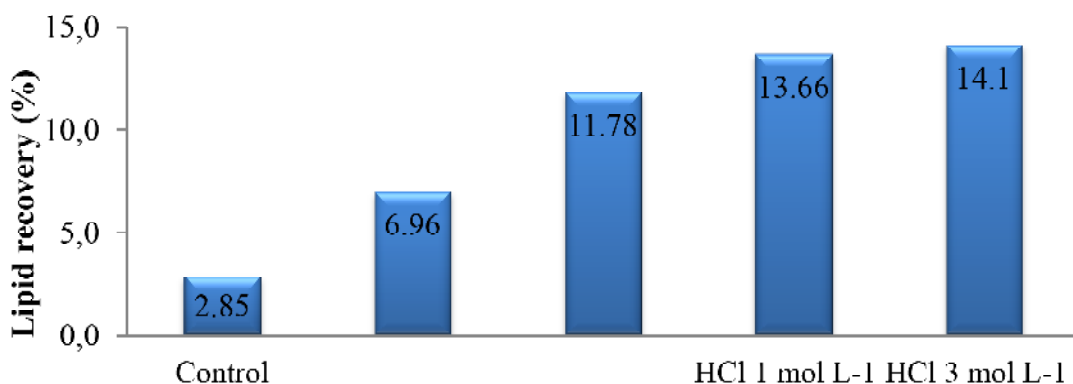


Figure 9. Effect of HCl concentration on the recovery rate of lipids.

Table 4. Data from the pretreatment with HCl.

Pretreatment	Average extracts / g	Standard deviation	LR / % w/w	BN / % w/w
HCl 0.1 mol L ⁻¹ 30 min. agitation	0.0233	0.0016	6.96	38.3
HCl 0.5 mol L ⁻¹ 30 min. agitation	0.0398	0.0033	11.78	55.2
HCl 1 mol L ⁻¹ 30 min. agitation	0.0463	0.0035	13.66	61.3
HCl 3 mol L ⁻¹ 30 min. agitation	0.0478	0.0019	14.1	82.1

LR: % w/w lipid recovery in the total biomass; BN: % w/w Biomass unrecovered.

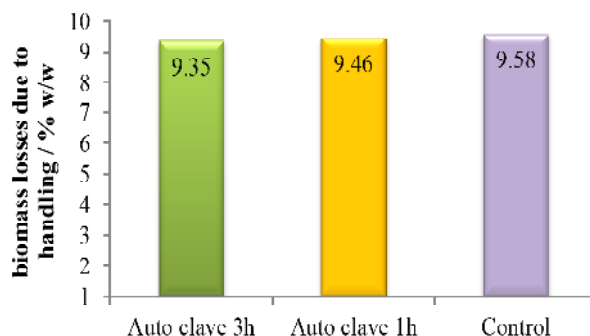


Figure 8. Losses of biomass heat treatment handling.

9, it is shown that the extraction yield increases when acid concentration is also increased within the range set but at concentrations greater than 0.5 mol L⁻¹, this effect is less pronounced with a tendency to stabilize. This tendency was similar to the one reported by Hernández, D *et al.* (2015) where small differences in sugar release were observed when the concentration of acid raised from 4% to 7% H₂SO₄ for *Nannochloropsis gaditana* (11).

Cell disruption promoted with HCl 3 mol L⁻¹ concentration, the highest percentage of recovery of lipids, is the 14.1% w/w of the total reported in Table 1. But working at this concentration, involves the use of six times the amount of reagent for very little performance increase when compared with that obtained at 0.5 mol L⁻¹ concentration of the acid, corresponding to 11.78% w/w. In addition, higher concentrations of hydrochloric acid might increase the levels of corrosion that can occur in the teams involved throughout the process. Therefore, a solution of 0.5 mol L⁻¹ hydrochloric acid was the most suitable for pretreatment of biomass, 250% w/w decline in spending on chemical agent worked to the maximum concentration, without affecting performance dramatically. In a similar way, Hernández, D *et al.* (2015) chose a 4% H₂SO₄ solution for further experiments despite the highest sugar release was obtained with 7% H₂SO₄, due to the slight differences observed in SR when applying a concentration of 4%, 7% and 10% of H₂SO₄ (11).

The changes caused by acid lysis of cells are not only significant as the percentage of recovery of lipids. A variable that reflects those changes is the percentage of unrecovered biomass (Figure 10). It is noted that when biomass is not treated (control), the losses are

around 10% w/w by autoclave treatment, where biomass suffered no significant physical changes (Figure 8). These losses can be attributed to sample handling throughout the process. Considering this fact as truthful, the high percentages of unrecovered biomass with chemical treatments under a water-soluble components present in the cells, leaves the process (liquor) during the filtering stage before extraction of lipids.

3.5 Organosolv Pretreatment

Although organosolv pretreatment increased the recovery rate of lipids in more than 3% w/w over the 3 hour heat treatment, did not surpass the results obtained with HCl 0.5 mol L⁻¹. The time of organosolv pretreatment on the enzymatic hydrolysis of cellulose was studied by other authors, who reported it as the only variable with individual effect significant due to the response variable concentration increased when the time of pretreatment was also increased (12). Nevertheless, this pretreatment involves high energy costs, a longer exposure time and use more chemicals. All this makes it inconvenient to use as a method of pretreatment prior to cell disruption with ethanol-hexane extraction.

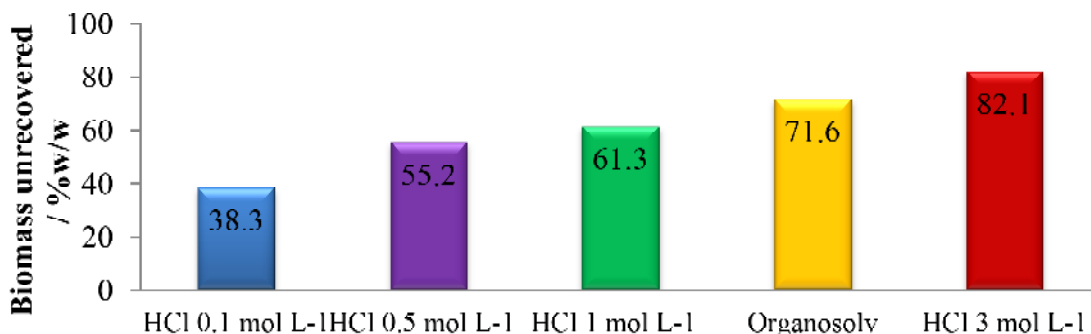


Figure 10. Not recovered biomass in pretreatment with HCl and Organosolv.

Table 5. Data from the pretreatment organosolv.

Pretreatment	Average extracts /g	Standard deviation	LR / % w/w	BN / % w/w
Organosolv	0.215	0.0079	9.55	71.6

LR: % w/w lipid recovery in the total biomass; BN: % w/w Biomass unrecovered.

3.6 Comparison of pretreatments

The values taken by the response variable (L_R) shows clearly that the chemical treatment with HCl 0.5 mol L⁻¹ was the most appropriate in comparison with thermal and organosolv pretreatment (Figure 11). This extraction method has lower yields compared tradi-

tional procedures for the recovery of lipids, but the product obtained is mainly composed of neutral lipids due to the selectivity of hexane, being this the most suitable fraction for later processes of esterification, transesterification or hydro-treatment.

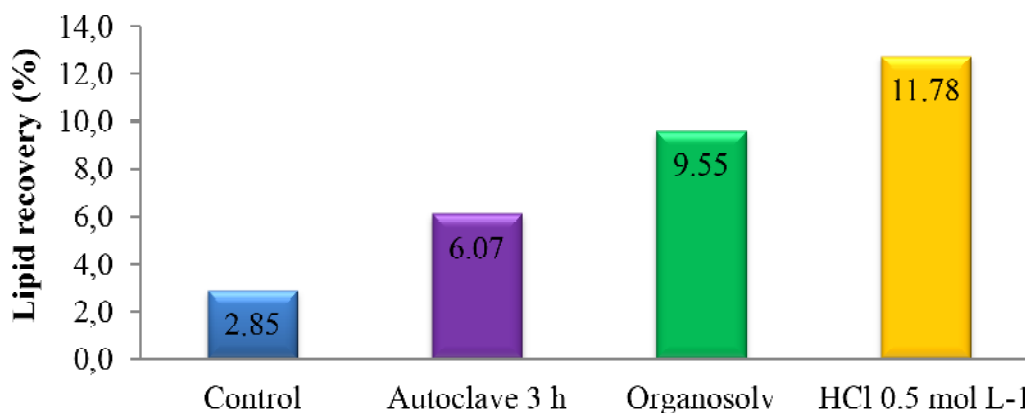


Figure 11. Comparison of biomass pretreatments.

4. CONCLUSIONS

A methodology for the oil extraction from microalgae using biomass of the genera *Nannochloropsis* sp. was developed. This process consists of two main stages: 1) chemical cell disruption with a solution of hydrochloric acid 2) Extraction of lipids with ethanol / hexane based on the methodology proposed, oil extraction with ethanol and purification with hexane.

The recovery rate of lipids was proportional to the concentration of hydrochloric acid within the range established for the pretreatment of biomass. However, an acid concentration of 0.5 mol L⁻¹ was the most suitable for the cell disruption process, reducing by 250% w/w reagent consumption compared to the maximum concentration worked, without significantly affecting the extraction yield.

Thermal pretreatment showed a significant increase in the percentage recovery of lipids for biomass without pre-treat but could not overcome any of the results obtained with the other pretreatments. An increase in

operating time by three hours is an unnecessary energy expenditure.

The moisture content in the sample pretreated is not favorable for the extraction process due to decreases the concentration of ethanol, thereby reducing its extraction capacity. Therefore it is necessary to dry the biomass pre-treated before the lipid extraction process.

The use of more chemicals, together with low yields, makes the method organosolv pretreatment inconvenient for cell disruption, prior to lipid extraction with ethanol / hexane.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thanks to Universidad de Cartagena, the Colombian Agriculture & Rural Development Ministry, the Colombian Department of Science, Technology and Innovation COLCIENCIAS, and the Colombian Petroleum Institute ICP-ECOPETROL for supporting this work.

BIBLIOGRAPHY

1. Hoekman SK. Biofuels in the U.S. – Challenges and Opportunities. *Renew Energy*. 2009 Jan;34(1):14–22.
2. Nigam PS, Singh A. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog Energy Combust Sci*. 2011 Feb;37(1):52–68.
3. Li Y, Horsman M, Wang B, Wu N, Lan CQ. Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid accumulation of green alga *Neochloris oleoabundans*. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2008 Dec;81(4):629–36.
4. Mata TM, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: A

- review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2010 Jan;14(1):217–32.
5. Peñaranda LA, Sepúlveda KJ, Álvarez YE, González A, Kafarov V. Evaluation of lipid and monosaccharide obtaining routes of microalgae biomass under the biore-finery concept. *ION.* 2011;24(2):13–22.
6. Fajardo AR, Cerdán LE, Medina AR, Fernández FGA, Moreno PAG, Grima EM. Lipid extraction from the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. *Eur J Lipid Sci Technol.* 2007 Feb;109(2):120–6.
7. Dos Santos RR, Moreira DM, Kunigami CN, Aranda DAG, Teixeira CMLL. Comparison between several methods of total lipid extraction from *Chlorella vulgaris* biomass. *Ultrason Sonochem.* 2015 Jan;22:95–9.
8. Miranda JR, Passarinho PC, Gouveia L. Pre-treatment optimization of *Scenedesmus obliquus* microalga for bioethanol production. *Bioresour Technol.* 2012 Jan;104:342–8.
9. Günerken E, D'Hondt E, Eppink MHM, Garcia-Gonzalez L, Elst K, Wijffels RH. Cell disruption for microalgae biorefineries. *Biotechnol Adv.* 2015 Feb;33(2):243–60.
10. Spiden EM, Scales PJ, Yap BHJ, Kentish SE, Hill DRA, Martin GJO. The effects of acidic and thermal pretreatment on the mechanical rupture of two industrially relevant microalgae: *Chlorella* sp. and *Navicula* sp. *Algal Res.* 2015 Jan;7:5–10.
11. Hernández D, Riaño B, Coca M, García-González MC. Saccharification of carbohydrates in microalgal biomass by physical, chemical and enzymatic pre-treatments as a previous step for bioethanol production. *Chem Eng J.* 2015 Feb;262:939–45.
12. Mesa L, López N, Cara C, Castro E, González E, Mussatto SI. Techno-economic evaluation of strategies based on two steps organosolv pretreatment and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse for ethanol production. *Renew Energy.* 2016 Feb;86:270–9.

PREVALENCIA DE FACTORES DE RIESGO CEREBRO-CARDIOVASCULARES EN ESTUDIANTES DE SALUD, ARMENIA-QUINDÍO 2014

PREVALENCE OF BRAIN-RELATED CARDIOVASCULAR RISK FACTORS IN HEALTH STUDENTS, ARMENIA-QUINDÍO 2014

Diana Patricia Londoño Buriticá¹, Jheimy Jackeline García Castañeda²

¹ Enfermera. Especialista en Promoción de la Salud. Magister en Salud Pública. Docente del programa de enfermería, facultad de ciencias de la salud de la Universidad del Quindío.

² Enfermera. Especialista en Gerencia de la Calidad y Auditoría en Salud. Magister en Salud Pública. Docente del programa de enfermería, facultad de ciencias de la salud de la Universidad del Quindío. jheimyjacke@gmail.com.

Recibido: 2 Diciembre de 2015

Aceptado: 22 Diciembre de 2015

*Correspondencia del autor: Diana Patricia Londoño Buriticá. Carrera 19 Nro. 10N43 Badajoz. Apartamento C 606. E-mail: dplondono@uniquindio.edu.co

RESUMEN

Las enfermedades cerebro-cardiovasculares representan la principal causa de muerte en el mundo en personas mayores de 45 años; en los últimos tiempos estos padecimientos se reconocen en población joven. Estas son enfermedades crónicas no transmisibles, que se relacionan principalmente con factores de riesgo modificables propios de los estilos de vida, aunque existe un componente hereditario que puede estar asociado a la aparición de la enfermedad.

El presente estudio cuantitativo, descriptivo, tuvo como objetivo medir la prevalencia de los factores de riesgo de enfermedades cerebro-cardiovasculares que tradicionalmente se han contemplado en la literatura. Se midieron edad, sexo, etnia y antecedentes familiares como factores de riesgo no modificables, y consumo elevado de alcohol, consumo de cigarrillo, inactividad física, Índice de Masa Corporal elevado y tensión arterial alta por toma casual, como factores de riesgo modificables.

La inactividad física (87,8%) y el consumo alto de alcohol (46,3%) se identificaron como los factores de riesgo modificables con mayor prevalencia en el grupo de jóvenes de 15 a 25 años. Se identificaron estudiantes con antecedentes familiares de enfermedades cerebro-cardiovasculares y personales de hipertensión arterial y de diabetes mellitus. Como hallazgo emergente del estudio, se identificó un 6,5% de la población estudiantil con bajo peso (IMC <18).

Se contrastaron los datos con algunos de investigaciones similares nacionales e internacionales, encontrándose factores de riesgo modificables con prevalencias más altas, que las reportadas en los mismos.

Palabras claves: Prevalencia, Factores de riesgo, Cerebrovascular, Cardiovascular, Estudiantes universitarios.

ABSTRACT

Cerebrovascular and cardiovascular diseases are the leading cause of death in people over forty-five years in the world. Recently, these conditions are also found in young people. These are chronic and non-communicable illnesses that are mainly related with modifiable risk factors inherent to lifestyles. However, there is a hereditary component that can be associated with the disease onset.

This quantitative and descriptive study aimed to measure the prevalence of cerebrovascular and cardiovascular diseases risk factors that have been traditionally considered in the literature. Age, gender, ethnicity and family history were measured as non-modifiable risk factors. On the other hand, high alcohol consumption, cigarette smoking, physical inactivity, high body mass index and casual high blood pressure measurement, were assessed as modifiable risk factors.

The most prevalent modifiable risk factors that were identified in the group of young people between fifteen and twenty five years old were physical inactivity (87,8%) and high alcohol consumption (46,3%). Students with family history of cerebrovascular and cardiovascular diseases, with personal history of high blood pressure and diabetes mellitus were also recognized. As an emerging finding of the study, it was identified that 6,5% of the student population was underweight (BMI <18)

Data were compared with some similar national and international researches, finding modifiable risk factors with higher prevalence than the ones reported in our investigation.

Keywords: Prevalence, risk, cerebrovascular, cardiovascular, university students.

INTRODUCCIÓN

Las enfermedades cerebro-cardiovasculares ECCV (agrupación de enfermedades cerebrales y del corazón, que se producen a partir del daño de los vasos sanguíneos, especialmente las arterias) son enfermedades crónicas, no transmisibles de gran relevancia para la salud pública por representar una gran carga de morbilidad y por considerarse como la principal causa de muerte en el mundo.

Se estima que aproximadamente 1 de cada 3 personas, es decir, alrededor de 17.5 millones, fallecen anualmente por cualquier afección de este grupo, entre las que más se presentan son las enfermedades isquémicas del corazón y las enfermedades hipertensivas. Para éstas últimas el American Heart Association (2012) estima “en 7,1 millones el número mundial de muertes, cifra que representa aproximadamente el 13% de la mortalidad total ¹”.

Las ECCV se presentan tanto en países desarrollados, como en aquellos poco industrializados. La Federación Internacional de Diabetes (2014) comenta que

“las muertes por estas causas afectan por igual a ambos sexos y más del 80% se producen en países de ingresos bajos y medios ²”. La transición demográfica y epidemiológica, el aumento de la esperanza de vida, la disminución de los nacimientos y un estilo de vida cada más sedentario, representan las causas directas de dichos eventos. Para el año 2011 la tasa de mortalidad por enfermedades cerebrocardiovasculares ECCV en Colombia, fue de 392,5/100.000 habitantes y para el año 2012, fue de 532,39/100.000 habitantes, según el Ministerio de Salud y de la Protección Social (2011-2012).

Las enfermedades cerebro-cardiovasculares (ECCV) no son la consecuencia de un solo factor de riesgo aislado, sino que representan el resultado final de un proceso que comienza tempranamente en la vida e involucra muchos otros factores: conductuales, ambientales, socioeconómicos y genéticos. Parece lógico entonces, que para prevenir estas entidades, sea necesario controlar varios factores de riesgo y sus determinantes, simultáneamente.

Se consideran factores de riesgo no modificables

1. American Heart Association. [Internet] 2012 [Consultado marzo 2014]; Disponible en: URL: <http://www.americanheart.org/presenter.jhtml?identifier=3001008>

2. International Diabetes Federation. [Internet] [Consultado julio 2014]; Disponible en: URL: <http://www.idf.org>

aquellas circunstancias propias de cada individuo que lo hacen vulnerable a padecer alguna de estas enfermedades y que por sus características, no pueden ser controladas ni disminuidas, entre ellos se encuentran la edad, el sexo, la etnia y los antecedentes familiares de ECCV. Si a éstas se suman factores de riesgo modificables, se potencia la posibilidad de padecer la enfermedad.

Los factores de riesgo modificables, hacen referencia generalmente a comportamientos de los individuos o de grupos poblacionales, conocidos como hábitos poco saludables y que se relacionan con el aumento o la predisposición al padecimiento de dichas enfermedades, que pueden ser prevenibles e intervenibles. Dichos factores son: la hipertensión arterial, la diabetes mellitus, el consumo de cigarrillo, el alto consumo de licor, la inactividad física, el inadecuado manejo del estrés, el sobrepeso u obesidad y las dislipidemias.

Según el Texas Heart Institute (2015) los factores de riesgo principales son: la hipertensión arterial, el aumento de los niveles de colesterol en sangre, la diabetes mellitus, la obesidad y/o sobrepeso, el consumo de cigarrillo, el sedentarismo, el sexo, la edad y la herencia. Los factores de riesgo contribuyentes son: el inadecuado afrontamiento del estrés y el consumo de licor³.

Fue de esta manera, como el presente estudio tuvo como objetivo, identificar la prevalencia de los factores de riesgo ECCV en los jóvenes de 15 a 25 años, estudiantes de enfermería y de medicina de la Facultad de salud de una Universidad pública del Quindío, año 2014. A partir de un estudio cuantitativo, observacional, descriptivo de corte transversal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estudio cuantitativo, observacional, descriptivo de corte transversal, que fue evaluado y avalado por los comités técnico y científico y de bioética de la Universidad donde se llevo a cabo.

La población participante (tipo censo) estuvo conformada por 231 estudiantes activos y matriculados de los programas de enfermería y medicina de la Facultad de Salud de una universidad del Quindío entre los años 2013 y 2014. Hombres y mujeres entre 15 y 25 años, incluidos aquellos con diagnóstico previo de hipertensión arterial y diabetes mellitus; no se incluye-

ron mujeres embarazadas.

Se realizó prueba piloto con estudiantes de la Facultad de Ciencias Sociales de la misma Universidad.

La recolección de la información se realizó en un plazo de 10 semanas, previo consentimiento de los directores de los programas de enfermería y medicina. Los estudiantes fueron abordados dentro de la misma facultad, previa revisión de la base de datos suministrada por la oficina de admisiones y registro.

Se aplicó cuestionario compuesto por 29 preguntas, además de la medición del peso, la talla y la tensión arterial, según protocolos elaborados para dichos fines, previa firma del consentimiento informado.

Se construyó base de datos. Se realizó análisis univariado identificando las prevalencias de los factores de riesgo modificables y no modificables; y análisis bivariado a través de la construcción de tablas de 2x2, OR aplicación de pruebas Chi² (X²) o test exacto de Fisher con sus valores de P.

RESULTADOS

La población sujeto de estudio estuvo conformada por 301 estudiantes que cumplían criterios de inclusión, de los cuales se logró la participación de 231 con un 76,6%.

Tabla 1: Variables sociales y demográficas del grupo de estudiantes participantes en el estudio (Denominador: 231)

		20 - 25 años	119	51,6	(44,8 a 58,0)
Programa	<i>Enfermería</i>		151	65,4	(58,8 a 71,4)
	<i>Medicina</i>		80	34,6	(28,5 a 41,2)
Semestre	<i>Primer Ciclo</i>		173	75	(68,7 a 80,2)
	<i>Segundo Ciclo</i>		58	25	(19,7 a 31,3)
Grupo Étnico	<i>Negro</i>		6	2,6	(1,0 a 5,8)
	<i>Blanco</i>		27	11,6	(7,9 a 16,7)
	<i>Mestizo</i>		196	84,8	(79,4 a 89,0)
	<i>Indígena</i>		2	0,8	(0,1 a 3,4)

Respecto al grupo de encuestados, se evidenció que éste estuvo representado en su mayoría, por mujeres (n=169), con un 73,1% (IC al 95%= 66,8% a 78,6%). Con respecto a los grupos de edad, estos se encuentran en porcentajes similares: grupo de 15 a 19 años con un 48,1% y grupo de 20 a 25 años con un 51,6%.

Un 84,8% (IC al 95%= 79,4% a 89,0%) de los participantes se representó en el grupo étnico mestizo. Sólo un 2,6% (IC al 95%= 1,0% a 5,8%) de los estudiantes se representó como afrodescendiente (Negro).

El grupo de estudiantes del programa de enfermería, dentro de la muestra, tuvo una representación de un 65,3% (IC al 95%= 50,8% a 71,4%). Los estudiantes cursaban en su mayoría el primer ciclo: de primero

a quinto semestre con un 75% (IC al 95%= 68,7% a 80,2%). Un 25% (IC al 95%= 19,7% a 31,3%) restante correspondieron al segundo ciclo: de sexto semestre en adelante.

A continuación, se presentan los hallazgos relacionados con las prevalencias de factores de riesgo tradicionales de enfermedad cerebro-cardiovascular y los criterios de definición de los mismos (tabla 2).

Tabla 2: Prevalencia de factores de riesgo modificables y no modificables, de enfermedad cerebro-cardiovascular en estudiantes de la facultad de ciencias de la salud, Universidad Quindío 2014.

Variable	Definición Estudio	n	Frecuencia	Prevalencia	IC 95%
Antecedentes Familiares Presentes	*	231	68	29,4%	23,7% a 35,8%
Diagnóstico Médico de HTA	Auto-reportada por DX médico y/o toma medicamentos	231	4	1,7%	0,5% a 4,6%
Diagnóstico Médico de DM	Auto-reportada por DX médico y/o toma medicamentos	231	1	0,4%	0,0% a 2,7%
Inactividad física	**	231	203	87,8%	82,8% a 91,6%
Alto Consumo de Alcohol	Consumo de licor al menos 1 vez en el último mes. En la última oportunidad Hombres más de 28 gramos y mujeres más de 14 gramos.	231	107	46,3%	39,7% a 52,9%
Ebriedad Alto Consumo Alcohol	Consumo de alcohol hasta la ebriedad	107	47	43,9%	34,4% a 53,8%
Fumador	Haber fumado más de 100 cigarrillos en la vida y el último, fumado en los últimos 6 meses	231	3,9	3,9%	1,9% a 7,5%
IMC Alto	IMC Alto: sobrepeso y obesidad, personas con IMC mayor a 24,9.	231	36	15,5%	11,2% a 21,0%
TA Alta	Por toma casual	231	17	7,3%	4,4% a 11,7%

* Familiares en primer grado de consanguinidad (Padres o Hermanos) con antecedente de enfermedad cerebro-cardiovascular, hombre menor de 55 años y/o mujer menor de 65 años.

** Inactividad física: persona que no haya realizado actividad física en la última semana, o aquella persona que haya realizado actividad 1 o 2 días en la última semana, o que realizando actividad física al menos 3 veces en la última semana pero la duración haya sido inferior a 30 minutos por día (Menos de 90 minutos por semana) con una intensidad moderada o enérgica. La intensidad de la actividad física se consideró, a partir de los siguientes criterios: i) Leve, como caminar. ii) Moderadas, aparece sudor en los primeros 10 minutos de la actividad. iii) Enérgicas, además de sudor, falta el aliento.

Factores de riesgo no modificables:

a. Antecedentes familiares en primer grado de consanguinidad de enfermedad cerebro-cardiovascular temprana: Los antecedentes familiares de enfermedad cerebro-cardiovascular en primer grado de consanguinidad, representaron la principal prevalencia de factores de riesgo tradicionales no modificables en la población de estudiantes a riesgo, con un 29,4% (IC al 95%= 23,7% a 35,8%).

Los antecedentes familiares de ECCV se encuentran en el 40,3% de los hombres (IC al 95%= 28,3% a 53,5%) y en mujeres del 25,4% (IC al 95%= 19,2 a 32,8%). Existen diferencias significativas en esta variable según sexo (X^2 1 g.l. 4,12; valor $p=0,04$), $RP=1,58$ (IC al 95%= 1,6 a 2,36).

Llama la atención encontrar prevalencias tan altas en el grupo de estudiantes.

Según el Texas Heart Institute

“las enfermedades del corazón suelen ser hereditarias. Si padres o hermanos padecieron de un problema cardíaco o circulatorio antes de los 55 años de edad, la persona tiene un mayor riesgo cardiovascular que alguien que no tiene esos antecedentes familiares. Los factores de riesgo tales como la hipertensión, también pueden transmitirse de una generación a la siguiente”⁴.

b. Diagnóstico médico de hipertensión arterial: La prevalencia de hipertensión arterial diagnosticada por médico con o sin tratamiento farmacológico, en la población a riesgo fue de 1,7% (IC al 95%= 0,5% a 4,6%).

La hipertensión arterial se encuentra en el 4,8% de los hombres (IC al 95%= 1,2% a 14,3%) y en mujeres la prevalencia fue de 0,5% (IC al 95%= 0,0% a 3,7). No se hallaron diferencias significativas según sexo.

c. Diagnóstico médico de diabetes mellitus: En los estudiantes a riesgo diagnosticados con diabetes mellitus se presentó una prevalencia de 0,4% (IC al 95%= 0,0% a 2,7%) representada en una persona.

El caso estuvo representado por una mujer mestiza de

22 años de edad, estudiante de enfermería del segundo ciclo. Diagnosticada en el año 2.003 y desde ese momento se encuentra en tratamiento farmacológico. No es hipertensa y no tiene antecedentes familiares de ECVV.

Los hallazgos sobre los factores de riesgo no modificables, brindan un panorama general de la situación actual de los mismos en la población participante. Si bien este tipo de factores de riesgo no pueden ser intervenidos, la presencia de antecedentes familiares potencializada por factores de riesgo modificables, marcan una tendencia favorecedora del desarrollo de enfermedad cerebro-cardiovascular.

Según el Texas Heart Institute (2015) el riesgo es acumulativo a lo largo de la vida. A más factores de riesgo y mayor edad, mayor probabilidad de que suceda el evento.

Factores de riesgo modificables:

a. Inactividad física habitual: La inactividad física habitual fue el factor de riesgo modificable tradicional con la prevalencia más alta con un 87,8% (IC al 95%= 82,8% a 91,6%) representado en 203 personas.

Estos hallazgos sobre la inactividad física son muy importantes si se tiene en cuenta que la “inactividad física es el cuarto factor de riesgo de mortalidad en el mundo, según la OMS (2010) ⁵”. La práctica de actividad física regular se relaciona con mejores niveles de salud de las personas, mejora el pronóstico y la evolución de los hipertensos y de los individuos que han tenido episodios cardiovasculares. Ayuda además a mantener el control del peso corporal y mejora la salud mental en personas sanas y/o enfermas.

b. Consumo alto de alcohol: El alto consumo de alcohol es el segundo factor de riesgo tradicional modificable más prevalente en el grupo de estudiantes a riesgo, con un 46,3% (IC al 95%= 39,7% y 52,9%).

El consumo de alcohol alto no presenta diferencias significativas entre el grupo de hombres y mujeres, tampoco por grupos de edad o programa académico.

4. Texas Heart Institute. [Internet] [Consultado marzo 2015]; Disponible en: URL: http://www.texasheartinstitute.org/HIC/Topics_Esp/HSmart/riskspan.cfm

5. World Health Organization. Global status report on noncommunicable diseases 2010. WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 2011. ISBN 9789240686458

La importancia de este factor de riesgo tradicional modificable, radica además en el hallazgo del componente de ebriedad. Un 44% de todos los estudiantes que consumieron licor en el mes anterior al diligenciamiento de la encuesta, manifestaron hacerlo hasta la ebriedad, lo que genera mayores implicaciones para la salud física y mental del individuo.

c. Índice de masa corporal IMC: La prevalencia de la variable índice de masa corporal alto fue de un 15,5% (IC al 95%= 11,2% a 21,0%), incluyendo aquellos datos que revelan sobrepeso y obesidad.

El índice de masa corporal IMC, es una medida de obesidad que relaciona el peso y la talla de los individuos. Según la Organización Mundial de la Salud OMS, un IMC mayor o igual a 25, se clasifica como sobrepeso y un IMC mayor o igual a 30, se clasifica como obesidad.

Los datos de IMC alto, se presentaron de la siguiente forma: sobrepeso (IMC >24,9 y <30) 11,6% (IC 95%= 7,9% a 16,7%) y obesidad grado I (IMC >29,9 y <35) 3,9% (IC 95%= 1,9% a 7,5%). No existen diferencias significativas para esta variable, según el sexo.

Llama la atención un hallazgo dentro del presente estudio, se relaciona con la prevalencia del IMC <18.0 en un 6,5% de la población de estudio (IC al 95%= 3,8% a 10,7%). Sin embargo estos valores no pueden ser contrastados, por carecer de datos en otros estudios.

d. Consumo de cigarrillo: La prevalencia general de consumo de cigarrillo fue 3,9% (IC al 95%= 1,9% a 7,5%). En hombres fue 4,8% (IC al 95%= 1,2% a 14,3%) y en mujeres 3,5% (IC al 95%= 1,4% a 7,9%).

No existe diferencia significativa para esta variable, según sexo y programa académico.

e. Tensión arterial alta: En el caso de las cifras tensionales elevadas por toma casual, se encontró una prevalencia de un 7,3% (IC al 95%= 4,4% a 11,7%).

Los datos de tensión arterial se encuentran en el 16,1% de los hombres (IC al 95%= 8,4% a 28,1%) y en mujeres del 4,1% (IC al 95%= 1,8 a 8,6%). Existen diferencias significativas en esta variable según sexo (X^2 1 g.l. 7,88; valor $p= 0,00$), $RP= 3,49$ (IC al 95%= 1,55 a 9,78).

Aunque los hallazgos sobre la medición de la tensión arterial no son datos equiparables con diagnóstico de hipertensión arterial, es preocupante encontrar cifras del 7,3% y más aún, cuando es más alta en el grupo de hombres con un 16,1%. Adicionalmente, aquellos estudiantes que efectivamente son hipertensos y aun no lo saben, no han iniciado tratamiento farmacológico, ni han asumido cambios en su estilo de vida, que los ex-

En resumen, del grupo de estudiantes encuestados se puede observar:

Tabla. 3: Prevalencia de factores de riesgo modificables y no modificables, de enfermedad cerebro-cardio-vascular en estudiantes de la facultad de ciencias de la salud, Universidad Quindío 2014.

F. R. No Modificables	n	Prevalencia	IC 95%
Estudiantes sin F. Riesgo	123	53,2%	46,6 a 59,7
Estudiantes con 1 F. Riesgo	81	35,0%	29,0 a 41,6
Estudiantes con 2 F. Riesgo	26	11,2%	7,6 a 16,2
Estudiantes con 3 F. Riesgo	1	0,4%	0,0 a 2,7
F. R. Modificables	n	Prevalencia	IC 95%
Estudiantes con 1 F. Riesgo	116	50,2%	43,6 a 56,8
Estudiantes con 2 F. Riesgo	76	32,9%	26,9 a 39,4
Estudiantes con 3 o más F. Riesgo	39	16,8%	12,4 a 22,4
Estudiantes libres de F. Riesgo	8	3,4%	1,6 a 6,9

ponen a sufrir complicaciones mayores; más aun, este tipo de padecimientos son más frecuentes en personas adultas de mayor edad y se relacionan frecuentemente con patrones de conductas que pueden ser identificadas y contrarrestadas a tiempo.

Así, se evidencia que la prevalencia de los factores de riesgo de ECCV es muy alta para la población de estudio y que pese a los conocimientos en salud, los factores de riesgo modificables son los más frecuentes.

Análisis bivariado:

Para el análisis bivariado se definieron las variables que se suponían como factores de riesgo y aquellas de resultado.

En este caso las variables consideradas como factores de riesgo, fueron: edad, sexo, etnia, programa académico, semestre y antecedentes familiares.

Las variables consideradas como resultado, fueron: hipertensión arterial, diabetes mellitus, consumo de licor, consumo de cigarrillo, inactividad física, tensión arterial e índice de masa corporal. Con respecto a la variable ebriedad, esta sólo fue considerada para el grupo de personas con consumo de licor.

Con el fin de establecer la existencia de asociación entre las variables consideradas factores de riesgo y las variables consideradas de respuesta, se construyeron tablas de 2x2 y se aplicaron pruebas de asociación: OR, y pruebas de significancia estadística: Chi2 (X^2) y test exacto de Fisher.

Se calcularon O.R. (Odds Ratio) y su respectivo intervalo de confianza para cada una de las 35 tablas construidas, buscando asociación entre las variables analizadas (magnitud de la asociación). Las pruebas de Chi2 (X^2) y test exacto de Fisher se usaron para determinar si se encontraba asociación estadísticamente significativa.

Las pruebas de Chi2 (X^2) muestran el valor calculado para el mismo y el valor P correspondien-

te con un grado de libertad. La regla de decisión para rechazar la hipótesis nula (H_0 : No hay diferencia significativa entre los grupos observados) fue un valor P igual o inferior a 0,05.

El test exacto de Fisher se calculó para aquellas tablas de 2x2 en donde los valores esperados en alguna de las casillas fueron de 5 o menos. Esta prueba muestra los valores del P calculado.

Para comparar los resultados obtenidos en la investigación con los datos obtenidos en otros estudios, se calcularon Razones de Prevalencias R.P con su respectivo intervalo de confianza al 95%.

Finalmente, los datos de este análisis muestran que ninguna de las relaciones entre las variables “factores de riesgo” y “resultado” es estadísticamente significativa.

DISCUSIÓN

Los hallazgos obtenidos en la presente investigación, son alarmantes. Al realizar comparaciones con otros estudios, se evidencian prevalencias más altas en factores de riesgo modificables, así:

Los niveles de inactividad física en la población universitaria estudiada (87,8%), podrían explicarse por la dinámica del pregrado. Las carreras de ciencias de la salud exigen ocupación del mayor tiempo posible, por parte de los estudiantes, así, las ocupaciones, las presiones y las exigencias de las carreras, limitan el tiempo libre de los estudiantes, momentos en los cuales se podrían disponer a realizar actividad física de forma regular.

Según los indicadores básicos para Colombia en el año 2011 se reportaron datos de inactividad física para población de 18 a 64 años con una prevalencia del 54,8% (hombres 63,5% y mujeres 46,1%). Para América Latina los datos según OMS (2010) son del 50% para mujeres y 40% para hombres, en la población general.

Al comparar los resultados obtenidos con resul-

tados de estudios similares, se hallan diferencias significativas (X^2 1 g.l. 54,8; valor $p=0,00$), entre las prevalencias de inactividad física para hombres y mujeres de 14 a 19 años en el estudio de Beck y colaboradores, Brasil (2011) (61,2%) y las prevalencias del presente estudio (87,8%) siendo ésta últimas más altas, $RP=0,70$ (IC al 95%= 0,64 a 0,75).

De igual forma la $RP=0,88$ (IC al 95%= 0,81 a 0,94) hallada en la comparación de los resultados de inactividad física del presente estudio (87,8%) con los datos para la ciudad de Cartagena, estudio de Guerrero y colaboradores (2009) (76,9%), muestran diferencias significativas (X^2 1 g.l. 10,10; valor $p=0,00$) encontrando prevalencias más altas para los estudiantes universitarios encuestados en la ciudad de Armenia.

En el presente estudio, los hombres y mujeres encuestados tienen prevalencias similares de inactividad física 87% y 88% respectivamente, diferente a lo que muestran estudios para Chile (Chiang, 1999), prevalencia de inactividad física en hombres del 47,8% y para mujeres del 73,7%. Reportes de Brasil (Cazuza de Farias, 2010) muestran prevalencias de inactividad física en hombres del 50,7% y para mujeres del 66,8%. En las tendencias y los reportes a nivel mundial y de Latinoamérica, los hombres son más activos que las mujeres (OMS 2010).

Con respecto al consumo de alcohol, los presentes hallazgos (prevalencia 46,3%) podrían darse por las facilidades que tienen los estudiantes de la universidad para adquirir las bebidas alcohólicas.

Además los estudiantes universitarios pueden tener un poder adquisitivo mayor que otros jóvenes y al vivir solos o con grupos de amigos, puede ejercerse menor control por parte de sus familias.

Según los indicadores de salud del año 2011, para Colombia, el consumo de alcohol (último mes, en el momento de la encuesta) fue del 46,06% para hombres y del 24,83% en mujeres de 12 a 65 años.

Un estudio de Cartagena (2009) reportó en 86,9% la prevalencia de consumo de alcohol, para hombres y mujeres. Al comparar los datos del presente estudio con los datos reportados para Cartagena, se halla una $RP=1,87$ (IC al 95%= 1,62 a 2,17) con diferencias significativas (X^2 1 g.l. 107,65; valor $p=0,00$). Llama la atención que para dicha ciudad la prevalencia de consumo de alcohol, sea más alta que la reportada en el presente estudio.

Dado el enfoque de factores de riesgo tradicionales para enfermedad cerebro-cardiovascular, el Texas Heart Institute muestra como el alto consumo de alcohol se convierte en un riesgo para el padecimiento de la misma. El consumo moderado de alcohol (menos de 14 gramos/día en mujeres o menos de 28 gramos/día en hombres) se ha descrito como un factor cardioprotector, especialmente el consumir vino tinto a diario, según la American Heart Association (2011) y la OMS. Para efectos del presente estudio, se tuvo en cuenta como factor de riesgo aquel consumo señalado como alto dentro del último mes.

Las prevalencias de consumo de cigarrillo reportadas por el presente estudio no son inferiores a las reportadas en estudios nacionales e internacionales (Cartagena, Brasil). Al comparar los datos del con los reportados para Cartagena (2009) (12,7%), se halla una $RP=3,25$ (IC al 95%= 1,62 a 6,52) con diferencias significativas (X^2 1 g.l. 11,75; valor $p=0,00$). Llama la atención que en esta ciudad (Cartagena) la prevalencia de consumo de cigarrillo, sea más alta que la reportada en el presente estudio.

Los datos de las prevalencias de hipertensión arterial reportada (1,7%) e Índice de Masa Corporal IMC alto (15,5%) no pudieron ser contrastados con otros estudios, por carecer de información para este grupo específico de edad, en relación a estudios de Chile año 1999, Cartagena año 2009 y Brasil año 2010.

Conclusiones

Las enfermedades cerebro-cardiovasculares ECCV son la principal causa de muerte en el

mundo entero y generan una gran carga de morbilidad. En su informe del año 2010 sobre las enfermedades crónicas no transmisibles la OMS ha hablado de una epidemia mundial, para la cual reporta cuatro principales factores de riesgo: i) Consumo de tabaco. ii) Práctica insuficiente de actividad física. iii) Consumo inmoderado de alcohol (perjudicial). iv) Alimentación poco sana (aumento en el consumo de sal, azúcares, grasas saturadas y poco consumo de frutas y verduras).

La importancia de los factores de riesgo tradicionales de las ECCV radica en que en su mayoría dependen de las conductas y formas de vida de las personas, conductas que al ser identificadas, deberían ser intervenidas, disminuyendo así su impacto y evitando la acumulación del riesgo que puede desencadenar en la generación de dichos eventos.

Los estudios han centrado sus esfuerzos en identificar dichos comportamientos en la población adulta, quienes por la edad y acumulación de riesgos tienen mayor probabilidad de presentar un episodio similar. En población joven y universitaria se referencian estudios de España y Chile (1999), Brasil (2011) y Argentina, para América Latina. En Colombia, los pocos estudios referenciados se circunscriben a ciudades como Cartagena (año 2009), Santa Fe de Bogotá y algunos poblacionales en Bucaramanga y Santiago de Cali (año 2005) que incluyen grupos de personas jóvenes.

Los hallazgos del presente estudio sobre factores de riesgo tradicionales modificables en jóvenes estudiantes de la facultad de salud son alarmantes. Prevalencias de eventos como la inactividad física y el consumo de licor son mayores que aquellos reportados en otros estudios. Se aplicaron pruebas de significancia para realizar comparaciones con estudios en Brasil (2011), Chile (1999) y Cartagena (2009) con las cuales se evidenció prevalencias superiores en inactividad física al comparar con estudios en Brasil, y más bajas para consumo de alcohol y cigarrillo al comparar con el estudio de Cartagena.

Aunque no se cuenta con información u otros estudios en población similar (enfermería – medicina) en factores de riesgo de ECCV, que pudieran ser comparados con los del presente estudio, se considera que los resultados son alarmantes. Se esperaría que la formación en salud y para la salud facilitara la adquisición de conocimientos y herramientas que les permitiera a los estudiantes, tomar decisiones sobre sus comportamientos de riesgo, ya que según Tobón (2011) “la educación y la información se relacionan con el desarrollo de habilidades personales para optar por decisiones saludables ⁶”.

Se supone entonces, que la educación y los conocimientos en el tema no son suficientes para la adquisición de hábitos saludables. El entorno desempeña un papel fundamental en los mismos y así como el hogar, el ambiente universitario es vital en la adquisición de prácticas saludables y en el desarrollo integral de los individuos.

Existen factores internos y externos a las personas que se relacionan con sus prácticas de autocuidado, según el Ministerio de la Protección Social (2014) “los conocimientos y la voluntad son factores internos; del mismo modo, los aspectos culturales, económicos, políticos y sociales son factores externos que determinan las prácticas de autocuidado ⁷”.

Muchas universidades en Colombia han asumido su responsabilidad en el mejoramiento de las condiciones de salud y calidad de vida de sus integrantes y han conformado la red de universidades saludables. Si se tienen en cuenta que la población universitaria está compuesta en su mayoría por individuos jóvenes especialmente en su etapa de adolescencia y adultez temprana, época en la cual las personas afianzan sus conocimientos y prácticas y siguen como modelo a sus pares; la intención y compromiso de estas instituciones es la puesta en marcha de actividades en el marco de la escuela saludable y la responsabilidad so-

6. Tobón Correa, Ofelia. El autocuidado: una habilidad para vivir. Universidad de Caldas, programa de enfermería. Manizales, Caldas 2011.

7. Ministerio de la Protección Social. [Internet] [Consultado Mayo 2014]; Disponible en: URL: <http://www.minproteccionsocial.gov.co>

cial que asume un centro de educación superior en la formación integral de personas, se presenta la oportunidad propicia para generar espacios de reflexión y trabajo en torno a las enfermedades cerebro-cardiovasculares y a sus factores de riesgo.

Se genera entonces, la necesidad de diseñar y adoptar planes y programas de intervención, educación e investigación en prevención de factores de riesgo de ECCV en las Universidades de la región y el país, dado que la Organización Panamericana de la Salud (2009) manifiesta que

“la única forma posible de abordar los distintos determinantes que deterioran la calidad de vida de la población es mediante la acción conjunta entre los diferentes actores sociales para transformar condiciones de vida de los miembros de la comunidad, potencializando sus capacidades individuales y colectivas en la producción de bienestar social ⁸”.

Se propone la generación de una política clara de universidad saludable contemplada en el proyecto educativo institucional y en cada uno de los proyectos educativos de sus facultades y programas, haciendo partícipes a todos los actores y dependencias universitarias, dado que

“una institución escolar no se convierte en escuela saludable por designación oficial de autoridades de salud o de educación, sino por decisión voluntaria de la comunidad educativa de promo-

ver mejores condiciones de vida para todos sus miembros y por todos los medios a su alcance, según la OPS (2009) ⁹”

Un ambiente escolar que propicie espacios de participación para los estudiantes, que brinde conocimientos en estilos de vida saludable y que permita la promoción de habilidades y destrezas como herramientas de autocuidado, posibilita la toma de decisiones que conduzca a los jóvenes a generar hábitos saludables en pro del bienestar y la calidad de vida.

La vigilancia y el monitoreo en salud se convierten en una herramienta importante en el seguimiento de los eventos, la recolección sistemática, análisis e interpretación de información del mismo. Todos estos datos son indispensables en la planificación, implementación y evaluación de los programas de intervención.

Los resultados reflejados en el presente documento pueden ser útiles como línea de inicio, en la implementación de un programa de vigilancia y monitoreo de factores de riesgo de enfermedad cerebro-cardiovascular, dirigido a los estudiantes universitarios, que incluya estrategias de promoción y educación para la salud, prevención de la enfermedad e investigación, que permitan aumentar las capacidades y oportunidades de la comunidad, para mejorar la calidad de vida, el desarrollo integral y la construcción de entornos favorecedores de la salud, a través de la acción interdisciplinaria.

8. Organización Panamericana de la Salud OPS. Estrategia de escuelas saludables 2009. [Internet] [Consultado Marzo 2015]; Disponible en: <http://www.minsalud.gov.co/Documentos%20y%20Publicaciones/Entorno%20Saludable%20y%20Desarrollo%20Territorial.pdf>

9. Organización Panamericana de la Salud OPS. Estrategia de escuelas saludables 2009. [Internet] [Consultado Marzo 2015]; Disponible en: <http://www.minsalud.gov.co/Documentos%20y%20Publicaciones/Entorno%20Saludable%20y%20Desarrollo%20Territorial.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

1. American Heart Association. [Internet] 2012[Consultado marzo 2014]; Disponible en: URL: <http://www.americanheart.org/presenter.jhtml?identifier=3001008>
2. International Diabetes Federation. [Internet] [Consultado julio 2014] Disponible en: URL: <http://www.idf.org>
3. Texas Hearth Institute. [Internet] [Consultado 30 de Marzo 2015]Disponible en: URL: http://www.texasheartinstitute.org/HIC/Topics_Esp/HSmart/riskspan.cfm
4. World Health Organization. Global status report on noncommunicable diseases 2010. WHO Library Cataloguing-in-Publication. 2011. ISBN 9789240686458
5. Tobón correa, Ofelia. El autocuidado: una habilidad para vivir. Universidad de Caldas, programa de enfermería. Manizales, Caldas 2011
6. Ministerio de la Protección Social. [Internet] [Consultado Mayo 2014] Disponible en: URL: <http://www.minproteccionsocial.gov.co>
7. Organización Panamericana de la Salud OPS. Estrategia de escuelas saludables 2009. [Internet] [Consultado Marzo 2015]; Disponible en: <http://www.minsalud.gov.co/Documentos%20y%20Publicaciones/Entorno%20Saludable%20y%20Desarrollo%20Territorial.pdf>
8. Alcaldía de Santiago de Cali, Secretaría de Salud Pública Municipal, Universidad del Valle. Centro para el Desarrollo y Evaluación de Políticas y Tecnología en Salud Pública, CEDETES. Proyecto Diseño de un sistema de Vigilancia de Factores de Riesgo asociados a las Enfermedades Crónicas No Transmisibles ECNT. Estudio de Prevalencia de Factores de Riesgo Asociados a las ECNT Cali, 2005.
9. Beck, Carmen Cristina et al. Factores de riesgo cardiovascular en adolescentes en un municipio de Brasil: prevalencia y asociaciones con variables sociodemográficas. Revista Brasileira de epidemiología, Brasil, 2011; 14(1): 36-49.
10. Cazuza de Farías, José et al. Factores de riesgo cardiovascular en adolescentes: prevalencia en asociación con factores sociodemográficos. Revista Brasileira de epidemiología, Brasil, 2011, 14(1): 50-62.
11. Chiang Salgado, María Teresa. Casanueva Escobar, Víctor et al. Factores de riesgo cardiovascular en estudiantes universitarios chilenos. Revista de salud pública de México. México 1999, 41(6).
12. Guerrero C, Angélica. Machado J, Cindy. Factores de riesgo de enfermedades crónicas en estudiantes universitarios, Cartagena, Corporación Universitaria Rafael Núñez. Colombia 2009

AJUSTE DE CURVAS DE DEGRADACIÓN DE MÓDULO DE CORTANTE Y RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO PARA LOS SUELOS DE CENIZAS: CASO ARMENIA (COLOMBIA)

SETTING DEGRADATION CURVES SHEAR MODULUS AND DAMPING RATIO FOR SOIL ASH IN ARMENIA (COLOMBIA)

Carlos Arturo García¹ Ocampo, Hugo Monsalve Jaramillo¹, Diego Andrés Peña Ceballos¹, Mario Andrés Pareja Soto¹

¹ Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Grupo Quimbaya, Universidad del Quindío

Recibido: 2 Diciembre de 2015

Aceptado: 22 Diciembre de 2015

*Correspondencia del los autores: E-mails: cacivil_uq@uniquindio.edu.co, hugom@uniquindio.edu.co, diego87andres@hotmail.com, marejo725@hotmail.com

RESUMEN

Este artículo propone dos modelos o ecuaciones en función del índice de plasticidad IP para describir la degradación del módulo normalizado de cortante y relación de amortiguamiento en suelos de ceniza volcánica para la ciudad de Armenia; las ecuaciones obtenidas se derivan de los ensayos dinámicos realizados a las muestras de suelo recolectadas en la microzonificación sísmica de la ciudad. El primer modelo está asociado a los suelos de ceniza, probados por medio del ensayo de triaxial cíclico que mide sus propiedades dinámicas a altos niveles de deformación; el segundo modelo se deriva del ensayo de columna resonante que mide las propiedades dinámicas del suelo ante bajas deformaciones. Se encontró que el índice de plasticidad IP es una variable fundamental en el modelo que describe el comportamiento dinámico de la ceniza volcánica, en donde se evidenció que la ausencia de la variable de esfuerzo de confinamiento efectivo σ'_o en los modelos obtenidos, generan una notable diferencia entre las curvas obtenidas con el modelo del ensayo de triaxial y el modelo del ensayo de columna resonante.

Palabras claves: Módulo de cortante, Relación de amortiguamiento, Índice de plasticidad, Triaxial cíclico, Columna resonante, Ceniza volcánica.

ABSTRACT

This paper proposes two models or equations based on the PI (plasticity index) to describe the degradation of normalized shear modulus and damping ratio in volcanic ash soils for the city of Armenia, the equations are derived from the dynamic tests performed at soil samples collected in the microzonation of the city. The first model is associated with ash soils, evidenced through cyclic triaxial testing to measure their dynamic properties at high strain levels. The second model is derived from the resonant column test that measures the dynamic properties of soil with low deformations. It was found that the IP is a fundamental variable in the model describing the dynamic behavior of volcanic ash, where it was shown that the lack of variable effective confinement pressure σ'_o in the obtained models, generate a notable difference between the curves obtained with the triaxial test model and the model of resonant column test.

Keywords: Shear modulus, Damping ratio, Plasticity index, Cyclic Triaxial, Resonant column, Volcanic Ash.

INTRODUCCION

Cuando se desea conocer la respuesta dinámica de un suelo frente a cargas sísmicas, se debe tener en cuenta la capacidad que tiene el suelo de disipar energía por medio de deformación; para ello se parte de las curvas de esfuerzo cortante versus deformación angular. Estas curvas de esfuerzo deformación se obtienen de ensayos de laboratorio, en donde se toma una probeta cilíndrica de suelo y se le aplica una carga hasta llegar al punto de falla de la muestra ensayada; la carga aplicada puede ser de dos tipos: constante y variable. La carga variable se conoce como carga cíclica, la cual hace que la curva esfuerzo deformación presente un comportamiento histerético.

Hacia finales de los años 60's y principios de los años 70's los ingenieros B. O. Hardin, V. P. Drnevich, T. Iwasaki y T. Kokushu investigaron estas curvas histeréticas de los suelos, encontrando que la rigidez del suelo, en este caso, el módulo de cortante, presentaba una degradación para cierto rango de deformaciones angulares, que de igual forma influyen en la capacidad de disipar la energía o de amortiguar la carga aplicada. Así nacieron las curvas de degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento, las cuales dependen de ciertas características físicas y mecánicas del suelo. Como característica física se tiene el índice de plasticidad IP, y como característica mecánica se tiene el esfuerzo de confinamiento del suelo. Para el caso de los suelos de ceniza volcánica, se tiene que son muy sensibles a la variable física, encontrándose suelos altamente plásticos debido a su elevado contenido de humedad ω ; en muchas muestras ensayadas en laboratorio se han encontrado contenidos de humedad que superan el 100% en estado natural (1); por tal razón resulta muy importante obtener unas curvas de degradación y amortiguamiento en función del índice de plasticidad de las cenizas volcánicas de la ciudad de Armenia, ya que se ha demostrado que entre más alto sea el índice de plasticidad, menor es el amortiguamiento del suelo frente a cargas sísmicas (2).

MARCO TEÓRICO

En el análisis unidimensional de un depósito de suelo, los parámetros dinámicos de los estratos son muy importantes en el cálculo de la respuesta del perfil de suelo modelado; dentro de estos parámetros dinámicos se tienen las curvas de degradación del módulo de cortante y radio de amortiguamiento, los cuales se generan por los esfuerzos cortantes inducidos por las

ondas sísmicas que se propagan por el subsuelo. Un suelo típico sujeto a cargas cíclicas simétricas puede exhibir comportamiento histerético, tal como se muestra en la Figura 1; este tipo de gráfico presenta unas curvas ("loops") con dos características importantes en cuanto a la forma: inclinación y amplitud. La inclinación de la curva depende de la rigidez del suelo, el cual puede ser descrito por el módulo de cortante tangente $G_0(3)$.

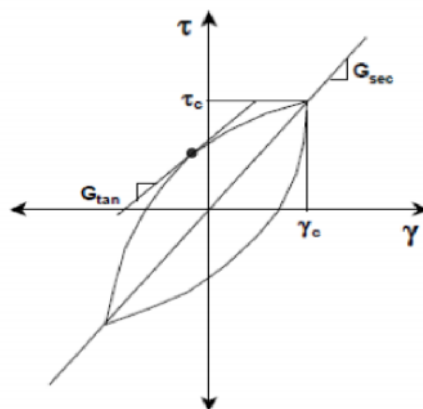


Figura 1: Módulo de secante G_{sec} en curva esfuerzo cortante-deformación angular [Tomado de Luna (3), 2000].

Obviamente este módulo varía con cada ciclo de carga, pero el valor promedio para toda la curva ("loop") se puede aproximar por medio del módulo de cortante secante:

$$G_{sec} = \tau_c / \gamma_c \quad (1.0)$$

Donde, τ_c y γ_c son el esfuerzo cortante y deformación cortante respectivamente, por lo tanto, el G_{sec} describe la inclinación general de una curva de histéresis. Por otro lado, la amplitud de la curva está relacionada con el área, con la cual se mide la energía disipada; esta puede ser descrita convenientemente por la relación de amortiguamiento:

$$\zeta = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{A_{loop}}{2\pi G_{sec} \gamma_c^2} \quad (2.0)$$

Donde W_D es la energía disipada, W_S la máxima energía de deformación y A_{loop} es el área de la curva ("loop"). Los parámetros anteriormente descritos, a menudo se refieren a un material lineal equivalente, con los cuales se puede obtener una curva de degradación del módulo de cortante y de relación de amortiguamiento tal como lo muestra la Figura 2.

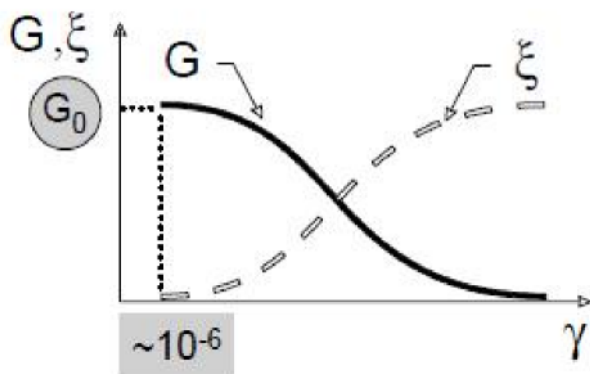


Figura 2: Curvas suavizadas de la degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento (Tomado de Santos (4), 2003).

Estos gráficos se construyen a partir de ensayos dinámicos de laboratorio tales como columna resonante, triaxial cíclico, bender element y otros. El primer ensayo mide las propiedades del suelo ante bajas deformaciones, el segundo mide las propiedades dinámicas del suelo a altos niveles de deformación, y el último ensayo mide la velocidad de la onda cortante en laboratorio en especímenes de suelo, usando un elemento piezoeléctrico (5).

En la determinación de los modelos normalizados de laboratorio para la degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento, se ha notado la influencia de la plasticidad del suelo en la forma de las curvas (5); se observó que el módulo de cortante de suelos con alta plasticidad se degradan menos rápido con deformaciones por cortante que los suelos de baja plasticidad, en cambio para la relación de amortiguamiento se comporta de manera opuesta. Después de hacer una revisión de los resultados experimentales de un amplio rango de materiales, se concluyó que la forma de la curva de degradación del módulo está más influenciada por el índice de plasticidad que por la relación de vacíos (2) y presentan el tipo de curvas mostradas en la Figura 3.

Estas curvas muestran que la deformación por cortante (γ) es muy grande para suelos de alta plasticidad en relación a los suelos de baja plasticidad; esta característica es extremadamente importante, ya que esto puede influenciar fuertemente la manera en la cual el depósito de suelo amplificará o atenuará el sismo.

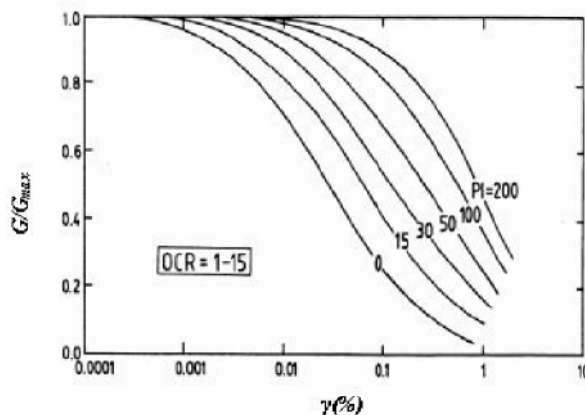


Figura 3: Curvas de degradación del módulo de cortante para suelos bien gradados con diferente plasticidad [adaptado de Kramer (5), 1996].

Las curvas de degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento también están influenciadas por la presión de confinamiento efectiva, particularmente para suelos de baja plasticidad (6), (7); varios investigadores han generado modelos de laboratorio en donde se tiene la relación G/G_{max} en función de la deformación por cortante (γ), índice de plasticidad IP y presión de confinamiento efectivo σ'_m (8).

METODOLOGIA DE AJUSTE

Para obtener unas curvas de degradación del módulo normalizado de corte y relación de amortiguamiento, se utilizaron los datos provenientes de los ensayos de triaxial y columna resonante realizados por Ingeominas y Uniandes a las muestras inalteradas extraídas de las perforaciones mecánicas del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Armenia (9). Para cada una de las muestras ensayadas, se varió el esfuerzo de confinamiento de acuerdo a la profundidad de extracción del espécimen de suelo. Para los ensayos de columna resonante y triaxial dinámico de Ingeominas, el esfuerzo de confinamiento varió de 0.3 a 2.2 Kg/cm², en cambio para los ensayos de Uniandes este confinamiento varió de 0.5 a 4 Kg/cm².

Se procedió a seleccionar el modelo matemático de Hardin y Drnevich (1972) (10) al considerarlo como el más adecuado para los datos recolectados:

Módulo de cortante:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (3.0)$$

Relación de amortiguamiento:

$$\frac{g}{g_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} = 1 - \frac{G}{G_{max}} \quad (4.0)$$

Este modelo se basa en funciones hiperbólicas para suavizar las curvas obtenidas de los ensayos dinámicos, pero también se tuvo en cuenta la variación del índice de plasticidad y su directa relación con el comportamiento de las curvas de degradación del módulo de corte normalizado (G/G_{max}) y de amortiguamiento (ξ) (2).

Para obtener el modelo de degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. De los ensayos dinámicos se extrajeron los siguientes datos:

Profund.	Gmax(Kg/cm2				
Ext	V (Kg/cm ²)	PI	LL	W	
2.4-2.85 m	0.5	61.4	81.9	86	50

Información del espécimen ensayado (Muestra inalterada de suelo tipo ceniza).

Tabla 1: Datos provenientes de ensayo de triaxial dinámico (9).

γ	ξ	G(Kg/cm ²)
0.01401	0.05227	12.39947
0.00998	0.07817	13.62469
0.00656	0.10313	16.46924
0.00317	0.19043	19.54483
0.00123	0.12496	29.36797
0.00071	0.09455	32.36029
0.00036	0.05592	39.00609

2. Se realizó un suavizado de los datos provenientes de los ensayos dinámicos, empleando modelos basados en funciones hiperbólicas-potenciales (11), esta función tiene la forma:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \alpha \gamma^\beta} \quad (5.0)$$

En donde la expresión $\gamma = \alpha Y^\beta$, es una función potencial derivada de los valores γ/γ_r versus las deformaciones angulares (Y); de la Tabla 1 se divide los valores de G entre el valor de $G_{max} = 50$, obteniéndose así el módulo de cortante normalizado (G/G_{max}) y también se obtiene el amortiguamiento máximo ξ_{max} que se calcula con la ecuación (4.0). Posteriormente se calcula para cada nivel de deformación angular (Y) los valores (G_{max}/G) -1.

Tabla 2: Módulo de cortante normalizado y amortiguamiento máximo para datos de laboratorio.

G/Gmax	ξ_{max}	Gmax/G-1
0.24799	0.06951	3.03243
0.27249	0.10745	2.66981
0.32938	0.15379	2.03596
0.39090	0.31265	1.55822
0.58736	0.30283	0.70253
0.64721	0.26801	0.54510
0.78012	0.25432	0.28185

Se grafican los datos de la Tabla 2 de (G/G_{max} -1) versus las deformaciones angulares (Y) en escala logarítmica (ver figura 4), y se calcula una línea de tendencia obteniéndose así una expresión matemática para representar una curva suavizada para los datos del primer ensayo dinámico. Además, se obtiene el mayor valor para el amortiguamiento $\xi_{max} = 0.31265$ para la muestra ensayada.

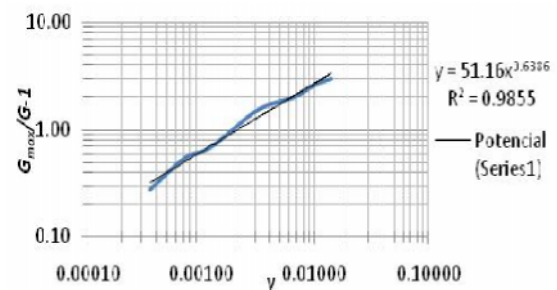


Figura 4: Regresión para obtener Y/Y_r .

La ecuación para el primer espécimen tomado a una profundidad de 2.4 a 2.85 metros y con un IP= 61.4 es:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + 51.16 \gamma^{0.639}} \quad (6.0)$$

El procedimiento descrito anteriormente se realiza para cada uno de los especímenes ensayados, ya que el índice de plasticidad IP cambia según la muestra extraída de campo.

3. En virtud a que la forma de las curvas de degradación del módulo normalizado de cortante y relación de amortiguamiento se ven afectadas directamente con el índice de plasticidad IP, entonces se obtiene una correlación de los Y_r versus IP de cada espécimen. Para hacer posible la correlación, las curvas que se generan por el suavizado de cada muestra deben tener un punto en común, en donde ese punto en común corresponde a un γ_r para el cual $G = G_{max}/2$ (de acuerdo a la ecuación 1). De esta manera se obtienen

tantos Y_r como especímenes (índice de plasticidad) se hayan ensayado; en la Tabla 3 se exponen los valores obtenidos de Y_r para $G/G_{max}=0.5$, en donde los valores subrayados no se tuvieron en cuenta en la correlación. Para el estrato de cenizas se suavizaron 8 curvas de degradación y amortiguamiento, pero solo 4 de ellas se seleccionaron para obtener la correlación, debido a que las 4 restantes (datos subrayados) se ensayaron con valores de confinamiento iguales y no representativos del perfil de suelo, afectando de manera significativa la correlación obtenida.

Tabla 3: Valores de Y_r para $G/G_{max}=0.5$

σ (KPa)	IP	Y_r
150	11.79	0.00393
100	19.9	0.00261
150	22.98	0.00368
300	24.9	0.00418
150	27.3	0.00360
300	36.7	0.00682
150	61.4	0.00285
150	80.73	0.00376

La correlación obtenida fue una tendencia lineal con un $R^2=0.991$, la ecuación posee la forma:

$$Y_r = 0.00024IP - 0.002 \quad (7.0)$$

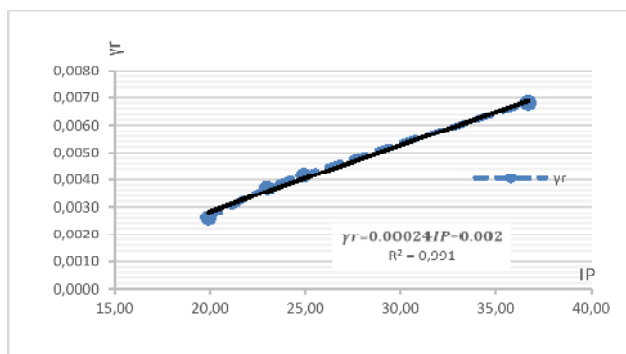


Figura 5: Correlación de Y_r versus IP para la muestra en estudio.

4. De igual forma se procedió para la obtención de correlación entre el amortiguamiento máximo ξ_{max} y el índice de plasticidad IP de cada espécimen; se seleccionaron 4 valores de ξ_{max} con confinamiento constante, obteniendo una correlación potencial con un $R^2=0.42$; por otra parte, se calculó otra correlación con confinamiento variable en donde se obtuvo una tendencia lineal con un $R^2=0.91$. En la Figura 6 se muestra el comportamiento del amortiguamiento ξ de las dos correlaciones para un $IP=15$. El problema que se tuvo con esta última correlación era que para va-

lores de IP menores a 20, se obtenían valores negativos de amortiguamiento, por lo tanto se decidió tomar como correlación la función potencial puesto que no presentaba este comportamiento.

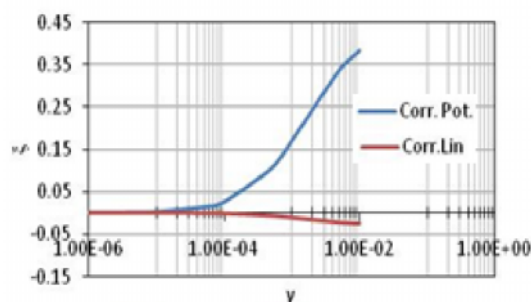


Figura 6: Curva amortiguamiento para $IP=15$.

Por lo tanto, la correlación potencial tiene la forma:

$$\xi_{max} = 1.5802 IP^{-0.479} \quad (8.0)$$

De acuerdo a la literatura, el ensayo de triaxial dinámico induce grandes deformaciones a la muestra de suelo, en cambio, el ensayo de columna resonante produce bajos niveles de deformación en el espécimen (5). Por tal razón, se decidió generar dos ecuaciones de curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento, el primero para los datos provenientes del ensayo triaxial y el segundo modelo se generó para datos provenientes del ensayo de columna resonante, esto con el fin de evitar la mezcla de datos de uno u otro ensayo, puesto que los procedimientos que se realizan en laboratorio para estas dos pruebas dinámicas difieren tanto en el tamaño de la muestra como en los componentes del equipo para ensayarlas.

A continuación se exponen las ecuaciones obtenidas en función del índice de plasticidad IP para los suelos de ceniza.

- Cenizas, ensayo triaxial (datos Uniandes):
Módulo normalizado de corte (para $IP>10$):

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{Y}{0,00024 * IP - 0,002}} \quad (9)$$

Relación de amortiguamiento:

$$g = (1.58 * IP^{-0.47}) \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right) \quad (10.0)$$

- Cenizas, ensayo columna resonante (datos Uniandes):

Módulo normalizado de corte (para $IP > 3$):

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{Y}{0.00005 * IP - 0.0001}} \quad (11.0)$$

Relación de amortiguamiento:

$$g = (0.006 * IP + 0.09) \left(1 - \frac{G}{G_{\max}}\right) \quad (12.0)$$

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con los modelos obtenidos se obtuvieron curvas de degradación de acuerdo a varios índices de plasticidad. En la Figura 7 se puede observar las curvas de degradación del módulo normalizado de corte de acuerdo a la ecuación del ensayo triaxial, y en la Figura 8 se observan las curvas de amortiguamiento asociadas a los ensayos de triaxial.

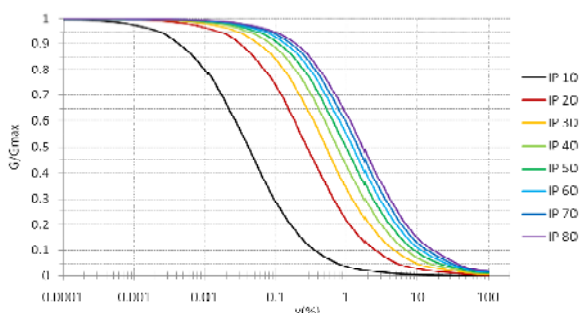


Figura 7: Curva de degradación del módulo normalizado de corte; modelo triaxial.

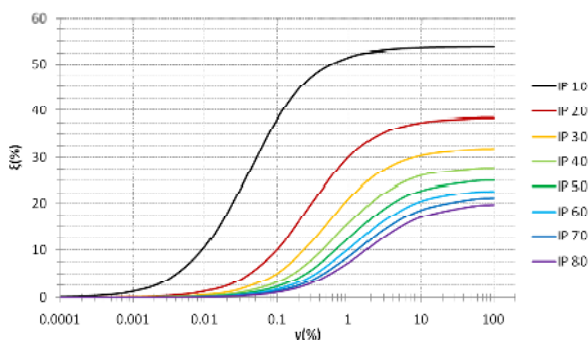


Figura 8: Curva de amortiguamiento; modelo triaxial.

En la figura 8 se puede ver que a medida que aumenta el índice de plasticidad, el amortiguamiento disminuye, lo cual es congruente con el comportamiento de las curvas de amortiguamiento para suelos bien graduados (2). Esta variación en las curvas se presenta, debido a que se obtuvo una correlación potencial que hace que los valores pequeños del índice de plasticidad no generen amortiguamientos de magnitud negativa. Para mejorar el modelo, se deben emplear más ensayos bajo distintos índices de plasticidad refinan-

do así la correlación obtenida.

En la Figura 9 se pueden ver las curvas de degradación del módulo normalizado de corte asociado a los ensayos de columna resonante.

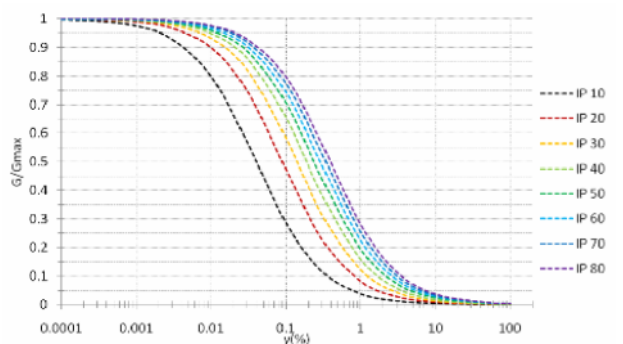


Figura 9: Curva de degradación del módulo normalizado de corte; modelo columna resonante.

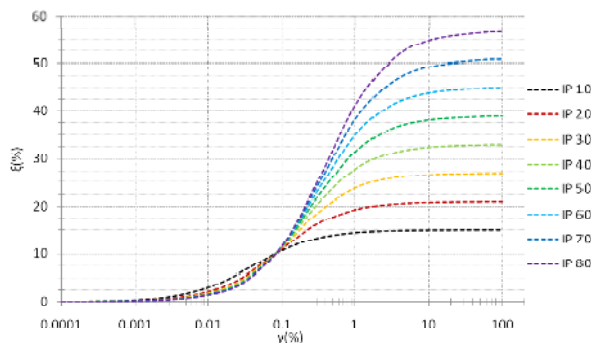


Figura 10: Curva de amortiguamiento; modelo columna resonante.

En la Figura 10 se puede observar el comportamiento de las curvas de relación de amortiguamiento, en donde éste aumenta conforme lo hace el índice de plasticidad, comprobando así que la correlación lineal obtenida para los datos del ensayo de columna resonante no es congruente con el comportamiento de las curvas de Vucetic y Dobry (2).

En la Figura 11 se tiene una comparación de las curvas de degradación del módulo normalizado de corte para un suelo con $IP=20$; se puede ver que la curva para el ensayo de triaxial (TRX) se degrada menos rápido que la curva asociada al ensayo de columna resonante (CR). De acuerdo a los rangos de deformación que describe cada ensayo, se esperaría una intersección de las curvas para un rango intermedio de deformaciones (0.1% a 1%); se sabe que para deformaciones menores 0.1%, el ensayo de columna resonante es ideal, por su parte el ensayo de triaxial describe mejor el compor-

tamiento de los suelos para deformaciones mayores a 0.1% (12). Al comparar las curvas, se observa que no ocurre la intersección esperada.

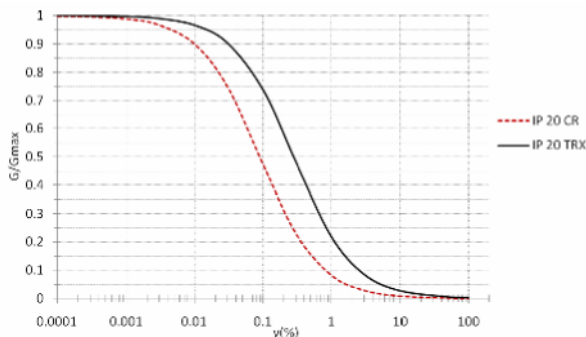


Figura 11: Curva de degradación del módulo normalizado de corte para suelo con IP=20, para ensayo de triaxial y columna resonante.

Este comportamiento se asocia a la forma como se obtuvieron las correlaciones para cada modelo, ya que solo se tuvo en cuenta como variable crucial el índice de plasticidad IP, pero de acuerdo a otros estudios, estas curvas están fuertemente influenciadas por el esfuerzo de confinamiento σ'_0 , ya que los suelos bajo tensiones de confinamiento altas se comportan como materiales más rígidos que los suelos sujetos a confinamientos menores (8).

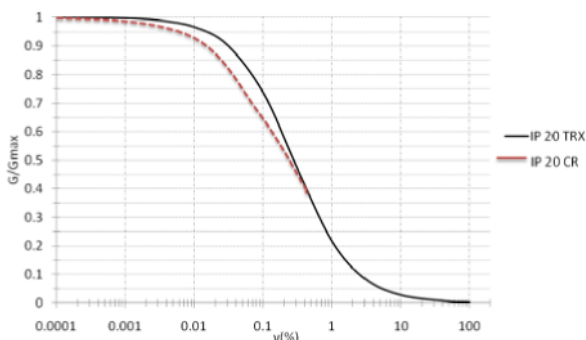


Figura 12: Comportamiento ideal de curva de degradación del módulo normalizado de corte de un suelo con IP=20.

En la Figura 12, se puede observar el comportamiento ideal entre el ensayo de columna resonante CR y en-

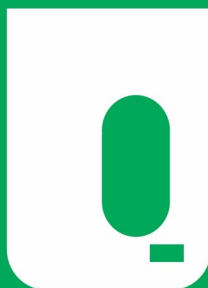
sayo de triaxial dinámico TRX, en donde la línea discontinua representa los valores del ensayo de CR para deformaciones menores a 0.1%; la línea continua que se encuentra por encima del ensayo CR, es una sobre estimación del módulo de corte G que se obtiene por el suavizado de la curva de laboratorio, puesto que con el ensayo de triaxial se obtienen los valores de cortante a partir de deformaciones mayores a 0.1%.

CONCLUSIONES

- Se obtuvieron dos modelos de degradación del módulo normalizado de corte y de relación de amortiguamiento para suelos de ceniza volcánica, debido a que se tienen dos ensayos dinámicos en donde las condiciones de las pruebas varían para el rango de deformaciones.
- Se encontró que la correlación con el índice de plasticidad IP en el modelo de relación de amortiguamiento más congruente con las curvas teóricas de Vucetic y Dobry es una función potencial, ya que la función lineal obtenida para el ensayo de columna resonante hace que los valores de amortiguamiento sean muy altos para suelos de alta plasticidad.
- Se comprobó que las curvas dibujadas con los modelos obtenidos bajo los ensayos de columna resonante y triaxial dinámico varían notablemente en todo el rango de deformaciones para un mismo valor de IP, producto de la influencia del esfuerzo de confinamiento, el cual no se tuvo en cuenta en las correlaciones.
- Se requiere de más ensayos dinámicos a suelos de ceniza volcánica con diferentes índices de plasticidad para así refinar el modelo de degradación del módulo normalizado de corte y relación de amortiguamiento de acuerdo a las correlaciones obtenidas en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Lizcano A., Herrera M.C., Santamarina J.C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol 6 (2). Pp 167-198.
2. Vucetic M. and Dobry R.(1991) Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, N°1., Pp. 89-107.
3. Luna, R. and H. Jari (2000), Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*, St. Louis, MO.
4. Santos J.A. (2003). Guías de clase: “Rigidez dos Solos-Curvas de Degradação, Projecto Geotecnico I. Mestrado em Geotecnica para Engenharia Civil. IST.
5. Kramer Steven L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington Editorial Prentice Hall. Pp. 230-240.
6. Iwasaki T., Tatsuoka F. and Takagi Y. (1978). Shear Modulus of Sands Under Torsional Shear Loading. *Soil and Foundation*, Vol. 18, N° 1. Pp. 39-56.
7. Kokusho T. (1980) Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range. *Soil and Foundation*, Vol. 20, N° 2. Pp 45-60.
8. Ishibashi I. and Zhang X. (1993). Unified Dynamic Shear Module and Damping Ratios of Sand and Clay. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 33, N° 1. Pp. 182-191.
9. Asociación Colombiana de ingeniería Sísmica (AIS), Universidad de los Andes, Universidad del Quindío, corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), Ingeominas. (1999) Estudio de micro-zonificación sísmica para orientar la reconstrucción de Armenia – Quindío. – Informe final.
10. Hardin B. O. and Drnevich V. P. (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of Soils Mechanics and Foundations*, Vol. 98, N° 7. Pp. 667- 692.
11. Yokota, K Imai; T. and Konno M. (1981). Dynamic deformation characteristic of soils determined by laboratory test. *OYO Tec. Rep 3*. Pp. 13-37.
12. Castellvi J. S. (1993). Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de Columna Resonante. *Revista de Obras Públicas*. N° 3319, Pp 57-66.



UNIVERSIDAD
DEL QUINDÍO