



REPORTES CIENTÍFICOS

D E L A F A C E N

ISSN 2078-399X (impreso)

ISSN 2222-145X (online)

Volumen 7

Número 2

2016

Análisis multitemporal con imágenes clasificadas de la zona de la cuenca del Lago Ypacaraí.

Caracterización de la irradiancia eritémica diaria basada en modelos de series temporales y determinación del índice UV en el Departamento Central del Paraguay.

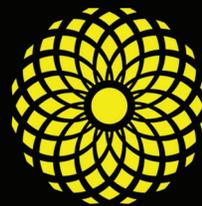
Evaluación hidrogeológica del Acuífero Independencia en el area noreste de la ciudad de Caazapá, Paraguay basado en datos de sondeos de exploracion mineral.

Estudio de la variabilidad de la concentración de material particulado en una zona de actividad minera de la ciudad de Itá en febrero del año 2015.

Caracterización de un mineral de Paraguay por Resonancia Paramagnética Electrónica.

Valoración de los parámetros de calidad de filmes radiográficos vencidos y almacenados en un depósito de la Administración Central de Salud.

Observación de ondas gravitacionales generadas por la fusión de un sistema binario de agujeros negros.



FACEN

Facultad de Ciencias
Exactas y Naturales

PUBLICACIÓN CIENTÍFICA
DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN-PARAGUAY

REPORTES CIENTÍFICO DE LA FACEN



Reportes Científicos de la FACEN, es una revista de libre acceso y publicación científica oficial de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción. Es emitida semestralmente y publica artículos originales, artículos de revisión, tópicos actuales, reportes de casos, comunicaciones cortas y cartas al editor, en las áreas de Biología, Química, Física, Matemática Pura, Matemática Estadística, Geología, Biotecnología y Tecnología de Producción. Los trabajos y opiniones publicados en la revista son de exclusiva responsabilidad de los autores.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Prof. Lic. Abel Bernal Castillo M.Sc.
Rector

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Prof. Constantino Nicolás Guefos Kapsalis, MAE
Decano

Dirección Web
www.facen.una.py

REPORTES CIENTÍFICOS DE LA FACEN

Dirección postal

Reportes Científicos de la FACEN, Dirección de Investigación de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Campus Universitario, Casilla de Correo 1039, San Lorenzo, Paraguay.

Teléfono/Fax
595 21 585600 interno 237

E-mail
reportescientificos@gmail.com

Dirección web
<http://www.facen.una.py/es/news/revistacientifica>

Revista indexada a:
Latindex y SciELOParaguay

Editor en Jefe

Lic. Fernando José Méndez Gaona, FACEN-UNA

Comité Editorial

M. Sc. Andrea Weiler de Albertini, FACEN-UNA

M. Sc. Fredy Julián Gómez Grance, FACEN-UNA

Dra. Celeste Vega, CEDIC

Dra. Miriam Rolon, CEDIC

Dra. Antonieta Rojas de Arias, OPS-PY

Dra. Ana Honfi, UNAM-Argentina

Dr. Julio Daviña, UNAM-Argentina

Dra. María Paula Badenes, INIFTA-UNLP-Argentina

Dr. Bolívar Rafael Garcete Barrett, FACEN-UNA

Dr. Robert Owen, TTU-USA

Dr. Anselmo Mc Donald, IGC-Panamá

Dr. José Seguinot, UPR-Puerto Rico

Dr. Ángel Vara Vela, IAG-USP-Brasil

Dr. Fábio Luis Teixeira Gonçalves, IAG-USP-Brasil

Dr. Sebastián Simondi, FCEN-UNC-Argentina

Dr. Víctor Velázquez, EACH-USP-Brasil

Dr. Nicolás Niveiro, IBN-UNNE_Argentina

M. Sc. Miguel Ángel Martínez Cabrera, FACEN-UNA

M. Sc. Danilo Fernández Ríos, FACEN-UNA

M.Sc. César Manuel Benítez Torres, FACEN-UNA

Diseño de tapa

César Arce

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol. 7, Nº 2	julio-diciembre de 2016	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	--------------	----------------------------	---

REPORTES CIENTÍFICOS

DE LA FACEN

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol.7, Nº 2	julio-diciembre de 2016	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	-------------	-------------------------	---

ARTÍCULOS ORIGINALES

- 63-75 **María Raquel Martínez.** Análisis multitemporal con imágenes clasificadas de la zona de la cuenca del Lago Ypacaraí.
- 76-86 **Viviana Isabel Díaz Escobar.** Caracterización de la irradiancia eritémica diaria basada en modelos de series temporales y determinación del índice UV en el Departamento Central del Paraguay.
- 87-95 **Narciso Cubas Villalba & Diego Adán López.** Evaluación hidrogeológica del Acuífero Independencia en el area noreste de la ciudad de Caazapá, Paraguay basado en datos de sondeos de exploracion mineral.
- 96-102 **Julissa Armoa.** Estudio de la variabilidad de la concentración de material particulado en una zona de actividad minera de la ciudad de Itá en febrero del año 2015.
- 103-108 **Walter Adrián Thompson Sosa.** Caracterización de un mineral de Paraguay por Resonancia Paramagnética Electrónica.
- 109-113 **Fredy Julián Gómez Grance, Analiz López, Oscar Alberto Velázquez Ortiz & Francisco Cabañas.** Valoración de los parámetros de calidad de filmes radiográficos vencidos y almacenados en un depósito de la Administración Central de Salud.

TÓPICOS ACTUALES

- 114-116 **Walter Thompson.** Observación de ondas gravitacionales generadas por la fusión de un sistema binario de agujeros negros.



ANÁLISIS MULTITEMPORAL CON IMÁGENES CLASIFICADAS DE LA ZONA DE LA CUENCA DEL LAGO YPACARAÍ

MULTITEMPORAL ANALYSIS WITH PICTURES CLASSIFIED IN THE AREA OF THE BASIN OF LAKE YPACARAI

MARÍA RAQUEL MARTÍNEZ¹ & SUSANA BEATRIZ FERRERO

¹Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) – UNA, San Lorenzo, Paraguay. Email: maraqrmar26@gmail.com

²Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina. Email: ferrsusana@gmail.com

Resumen: En los últimos años, en el Paraguay ha aumentado la demanda de información territorial y medioambiental debido a que se han extendido los espacios urbanos, la agricultura y la explotación forestal. A los efectos de entender mejor estos cambios del uso de la tierra y evaluar sus impactos, es importante monitorear el uso y cobertura del suelo mediante sensores de observación remota con una alta frecuencia temporal y extensión espacial. El empleo de los sensores remotos nos proporcionan un método viable, eficaz, rápido y económico de obtener imágenes. El análisis incluyó datos de imágenes ópticas provenientes del sensor Landsat para la zona de la cuenca del Lago Ypacaraí, en tres fechas. Se aplicó el método de clasificación de Máxima Verosimilitud Gaussiano a cada una de ellas, posterior a la selección y análisis estadístico de las muestras de entrenamiento. Una vez clasificada se validó la misma con una muestra de referencia y con la información dada por los coeficientes de Fiabilidad Global y de Concordancia Kappa. En la primera etapa se realizó un análisis multitemporal visual y en la segunda etapa se aplicaron dos técnicas de Detección de cambios para imágenes clasificadas, realizando el análisis gráfico y numérico. Las técnicas empleadas fueron eficientes para identificar los cambios ocurridos en la zona para las diferentes fechas.

Palabras Clave: *Teledetección, Clasificación de Máxima Verosimilitud Gaussiana, Detección de cambios.*

Abstract: In recent years, the demand for territorial and environmental information in Paraguay has increased, because the urban areas, agriculture and forestry have extended. In order to understand these changes in the soil use, and measure their impact, is important to follow it is use and coverage, using Earth Remote Observation Sensors with a high temporal frequency and spatial extent. The use of these remote sensors provide us a viable, effective, fast and economical method, for imaging. The analysis included data from optical images from the Landsat sensor area for the Lake Ypacaraí, in three dates. Sorting method Maximum Likelihood Gaussian, subsequent to selection and statistical analysis of training samples was applied to each. Once classified it was validated with a reference sample and the information given by the coefficients of overall reliability and consistency Kappa. In the first stage a visual multi-temporal analysis was performed and in the second stage two technical change detection applied to classified images, performing graphic and numerical analysis. The techniques used were efficient to identify changes in the area for different dates.

Key words: *Remote sensing, Maximum Likelihood Classification Gaussian, Detecting Changes.*

INTRODUCCIÓN

En Paraguay, el crecimiento de la densidad urbana y poblacional ha aumentado considerablemente en los últimos años, esto se debe al desarrollo económico, donde las pequeñas ciudades presentan una expansión en sus mallas urbanas. En los países desarrollados el proceso de urbanización se dio de forma lenta, gradual y planificada; sin embargo, en países en vías de desarrollo como Paraguay

ocurre de manera rápida y en general sin ninguna planificación.

De esta forma, la acelerada urbanización engendra considerables alteraciones en el medio ambiente, entre las cuales se encuentra afectada la Cuenca del Lago Ypacaraí.

Las actividades agrícola-ganaderas e industriales ubicadas en las cercanías del lago han vertido sus desechos en forma notoria en las últimas décadas, lo que ha causado contaminación en el mismo y en

consecuencia pérdida y deterioro de los ámbitos recreacionales y turísticos ubicados a su alrededor.

En este contexto, es necesario realizar un monitoreo ambiental que permita evaluar y comparar los cambios. Una herramienta muy útil para esto es la Teledetección. Desde el lanzamiento del primer satélite de teledetección, en 1972, se intensificaron estudios en diferentes áreas, revolucionando la forma en que la sociedad pasó a buscar información con respecto a su territorio. Las imágenes de alta resolución pueden informar sobre ambientes próximos y distantes, siendo una de las contribuciones de la tecnología moderna para el conocimiento de los paisajes de nuestro planeta; razón por la cual son consideradas como una poderosa herramienta para la estimación de estadísticas sobre agricultura, geología, del medio ambiente y otros.

Para obtener información relevante del medio ambiente de manera eficiente y económica, se destinan recursos significativos para el desarrollo y uso de la Teledetección, generándose así una gran cantidad de datos con mayor resolución, lo cual hace necesario el uso de las herramientas estadísticas y computacionales para resumir y analizar la información.

El análisis y procesamiento de las imágenes permiten obtener estimaciones de los tipos de ocupación y uso del suelo, de grandes áreas. A través de los años es cada vez más fácil la adquisición de imágenes satelitales, que por las características orbitales del satélite pueden ser adquiridas periódicamente y en condiciones similares de observación, facilitando así cualquier estudio que requiera una dimensión espacial o temporal (Jensen, 2005).

El análisis multitemporal permite detectar cambios entre dos fechas de referencia, deduciendo la evolución del medio natural o las repercusiones de la acción humana sobre ese medio (Chuvieco, 2010). Además, se puede establecer tareas de predicción, prevención, determinación de escenarios futuros, monitorización del medio natural, así como la estimación del cambio producido en las diferentes clases de uso y ocupación de la tierra. El uso de la Teledetección en este trabajo permitirá observar el tipo de ocupación existente sobre el suelo, ya sea

vegetación natural o espacios urbanos y detectar los cambios que existan a lo largo del tiempo.

La diversidad de imágenes obtenidas desde plataformas satelitales permite analizar el territorio desde una perspectiva cada vez más completa. La variedad de resoluciones espaciales hace posible estudios a diferentes escalas, mientras que la información espectral posibilita la caracterización de espacios o unidades de paisaje. Todo ello, unido a la periodicidad de adquisición de las imágenes, hace que estas técnicas sean idóneas para seguir la evolución del territorio a lo largo del tiempo. Por otra parte, el alto ritmo de desarrollo urbanístico actual de las ciudades crea la necesidad de poner a punto técnicas y métodos para la actualización cartográfica de estos entornos tan dinámicos.

Por consiguiente, la demanda de información territorial y del medio ambiente ha aumentado considerablemente, lo cual hace indispensable adoptar nuevas tecnologías que sean capaces de mejorar la calidad de la información. Esto supone, que la misma requiera habilidad y competitividad del sistema que produce esa información. En ese sentido, los métodos estadísticos son cada vez más utilizados en el análisis y procesamiento de imágenes, dado que permiten interpretar y extraer la información que ellas contienen; esto se debe a que se pueden asociar los datos de las imágenes con fenómenos aleatorios.

Este trabajo propone una metodología basada en técnicas de clasificación digital de imágenes para determinar si existen cambios en áreas de la zona de la Cuenca del Lago Ypacaraí, en distintas épocas a partir del año 2002.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la zona de la Cuenca del Lago Ypacaraí, entre los Departamentos Central y Cordillera (República del Paraguay) con las siguientes coordenadas geográficas: inferior izquierda Latitud = 25°23' 39", Longitud = 57°14' 40", y superior derecha Latitud = 25°14' 3" y Longitud = 57° 23' 32". El análisis de la zona está limitada por los municipios de Altos y San Bernardino, al

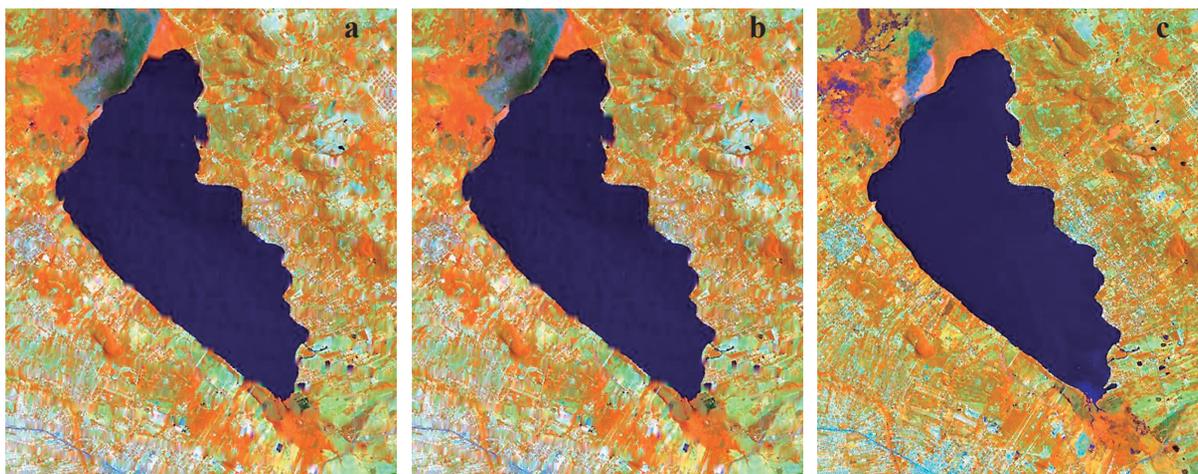


Figura 1. Composición RGB 453 de las subimágenes, que abarca la zona de la Cuenca del Lago Ypacaraí. a) Imagen Año 2002. b) Imagen Año 2010. c) Imagen Año 2014.

este y de Areguá, Itauguá y Capiatá al oeste, con una superficie aproximada de 270.000 km².

Materiales

Para realizar un análisis de clasificación multitemporal se usaron dos imágenes completas, de diferentes fechas, provenientes del satélite Landsat 7 ETM+ (años 2002 y 2010) y una imagen del Landsat 8 (año 2014), todas del mismo período (mes de septiembre), escena 226-77 del *World-wide Reference System*, extraída del sitio <http://www.glovis.usgs.gov> de descarga gratuita. A partir de las imágenes originales del área de estudio, se generaron subimágenes (una para cada fecha de la misma zona), con el fin de trabajar con menor cantidad de datos (debido al volumen de información disponible) y realizar las tareas de procesamiento de manera que fuera posible el uso de una computadora convencional (tiempo de procesamiento y memoria disponible).

Para el procesamiento de datos se utilizaron seis bandas: tres del espectro visible, una en el infrarrojo cercano, una en el medio y una en el lejano, con resolución espacial de 30 m y respuesta espectral de radiancia.

En el análisis de las imágenes Landsat se aplicó la georeferenciación, asignándole a cada píxel su coordenada geográfica, basada en el sistema de coordenadas local UTM WGS 84, Zona 21J, de-

bido a que toda la cartografía del área de estudio se encuentra en este Sistema de Coordenadas. El proceso y extracción de información de las mismas se realizó utilizando los programas: ENVI 4.7 (*Research System Inc., Boulder, Colorado, USA*), *R-Project 2.15*, Google Earth, Microsoft Excel 2010 y Notepad++.

Los datos utilizados en este trabajo corresponden a tres subimágenes de dimensión 600 X 500 X 6 (filas, columnas y bandas espectrales); esto significa que cada subimagen representa a una matriz numérica, donde el número de filas es 300.000 (600 X 500) y el número de columnas es 6 que corresponden a cada una de las bandas espectrales.

Para realizar la identificación de diferentes tipos de coberturas, se despliega la imagen en diferentes composiciones a color, por ejemplo se utilizan las bandas 3, 2 y 1, se obtiene una imagen de color verdadero, para falso color la combinación de las bandas 4, 3 y 2, utilizando preferentemente la composición (4, 5, 3) por su capacidad para detectar visualmente diferentes elementos de la superficie de la tierra. De esta manera, fue posible distinguir aquellos elementos más notorios en las imágenes, tales como zonas urbanas, agua, carreteras y otros, que sirven de referencia. Las subimágenes se presentan en la Figura 1, sobre la base de una composición de colores de tipo RGB 453.

Método

Etapa I

A cada una de las tres subimágenes se le aplica la clasificación supervisada con el método de Máxima Verosimilitud Gaussiana (MVG), para realizar un análisis visual principalmente de la evolución de zonas urbanas.

A continuación se describen las tres fases de la clasificación que son: Entrenamiento, producción y validación.

Entrenamiento

Para cada subimagen, fueron identificadas tres clases de acuerdo a la descripción de la Tabla 1. Es importante mencionar que si se contara con informaciones adicionales (datos *in situ*) se podría distinguir otros tipos de cobertura de suelo, haciendo un análisis detallado de la zona. Para realizar la clasificación se seleccionan aleatoriamente muestras de entrenamiento en cada clase, mediante digitalización de los píxeles en la imagen desplegada, en la pantalla del computador. El tipo de muestreo utilizado es el muestreo aleatorio estratificado, donde las clases constituyen los estratos, pues son homogéneos dentro y heterogéneos entre ellos, respecto de su nivel digital.

Se realiza un análisis exploratorio de las muestras de entrenamiento, para indagar la represen-

tatividad de ellas en cada clase y en cada banda espectral, evaluando también la separabilidad entre las clases.

Producción

Con los estimadores de los parámetros de cada clase, obtenidos de las muestras de entrenamiento (vector de medias y matriz de varianzas y covarianzas), se aplica el algoritmo de clasificación seleccionado MVG, obteniendo la regla de clasificación, a partir de Q. Con esta regla se recorre toda la imagen asignando a cada píxel una clase determinada, obteniendo la imagen clasificada denominada mapa temático.

Validación

En esta fase se mide la calidad del mapa obtenido, para ello se necesitan datos de referencias o también denominados puntos test, que representan la verdad del terreno. Estos datos constituyen muestras que fueron seleccionadas, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Teniendo certeza de la clase a la que pertenecen,
- en el mismo momento que las muestras de entrenamiento y
- asegurando que fueran diferentes de los datos de las muestras de entrenamiento.

Con estas *muestras test*, se construye la matriz de confusión, calculando el coeficiente de Fiabilidad Global, el coeficiente de Concordancia Kappa, la Fiabilidad del Productor y del Usuario, como también los Errores de Omisión y Comisión.

Una vez clasificadas las tres subimágenes se hace un análisis visual multitemporal de los cambios ocurridos en los mapas temáticos producidos.

Etapa II

En un segundo análisis, donde se tiene interés por cambios en el agua del lago, se consideran sólo las imágenes del 2002 y del 2014 las cuales serán clasificadas nuevamente, repitiendo las fases anteriores, con cambios en la selección de las muestras de entrenamiento. Se definen nuevas clases (estratos),

Tabla 1. Categorías utilizadas para la determinación de las diferentes clases.

Nro.	Clases	Color para la clase	Descripción
1	Urbano	Rojo	Terrenos destinados a la urbanización
2	No Urbano	Verde	Áreas bajas, sujetas a inundaciones, zona agropecuaria y bosques
3	Agua	Azul	Lagunas de pequeña extensión y el Lago Ypacaraí

Tabla 2. Clases utilizadas para el análisis de la Etapa II.

Nro.	Clases	Color para la clase	Descripción
1	Agua 1	Azul	Agua de la costa oeste
2	Agua 2	Gris	Agua del centro del lago
3	Fuera del lago	Rojo	Terrenos destinados a la urbanización y bosques
4	Humedal	Naranja	Áreas bajas, sujetas a inundaciones

donde se aplica un muestreo sistemático; a partir de grillas marcadas digitalmente respetando una distancia entre píxeles, para evitar la correlación espacial. En la Tabla 2 se detallan las nuevas clases.

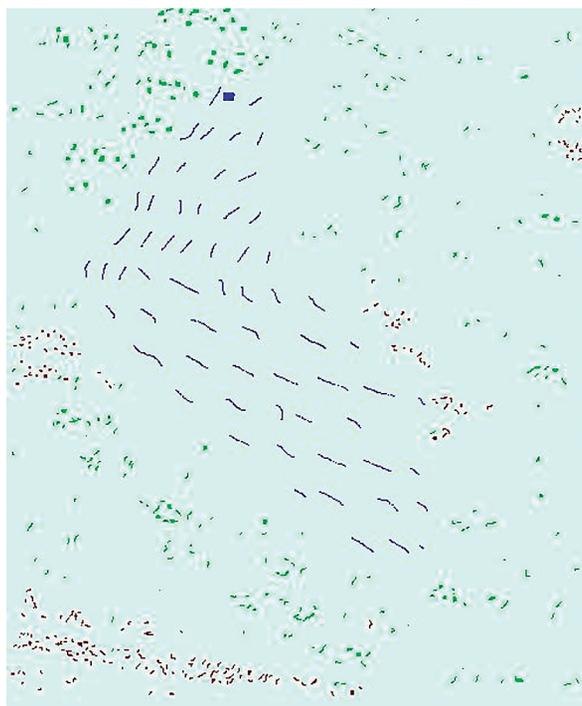
Una vez finalizadas las clasificaciones se obtienen dos mapas temáticos, uno para cada fecha. Para realizar el análisis multitemporal de los mapas temáticos se aplican técnicas de detección de cambios y se construye la matriz de cambios.

En este trabajo las técnicas utilizadas son:

- **Diferencia entre imágenes clasificadas**, se realiza una resta píxel a píxel, entre las categorías de los mapas temáticos de las dos fechas. Esta técnica permite discriminar

zonas donde se han experimentado cambios, las zonas estables presentarán un valor cero, mientras que las que hayan experimentado cambios darán valores positivos o negativos.

- La segunda técnica utiliza una **composición a color RGB**, que mediante la combinación fecha 2, fecha 1 y fecha 2, se consigue una imagen donde se visualiza los cambios ocurridos entre dos fechas.

**Figura 2.** Muestras de entrenamiento seleccionadas para cada una de las subimágenes.**Tabla 3.** Muestras de entrenamiento seleccionadas para cada clase.

Nro.	Clases	Color para la clase	Nro. de píxeles en la muestra	Descripción
1	Urbano	Rojo	1.000	Terrenos destinados a la urbanización
2	No Urbano	Verde	2.018	Áreas bajas, sujetas a inundaciones, zona agropecuaria y bosques
3	Agua	Azul	1.210	Lagunas de pequeña extensión y el Lago Ypacaraí
Total			4.228	

- Por último, se construye una **matriz de cambios** con la proporción aproximada de los cambios ocurridos en las clases.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la Etapa I

Tanto en la Figura 2 como en la Tabla 3 se observan las muestras de entrenamiento seleccionadas. Se utilizaron las mismas muestras en cada una de las fechas para luego poder comparar las clasificaciones.

Análisis Exploratorio

A continuación se presentan tablas y gráficos para evaluar la representatividad y separabilidad de las muestras. En la Tabla 4 están los estadísticos básicos para todas las bandas en cada clase de la imagen 2002 (mínimo, máximo, media, desviación estándar y coeficiente de variación). El mismo análisis se realizó para las demás imágenes del 2010 y 2014, aunque no se muestren los resultados.

En la imagen del año 2002 todas las clases presentaron un coeficiente de variación alrededor del 30%; lo cual indica que las muestras de entrenamiento son de buena calidad y las medias son representativas de cada clase.

En la Figura 3 se observan los diagramas de cajas correspondientes a las bandas 5 y 6, donde la clase Agua presenta poca variabilidad y valores

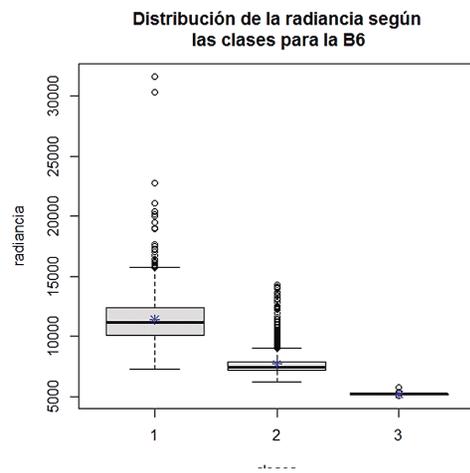
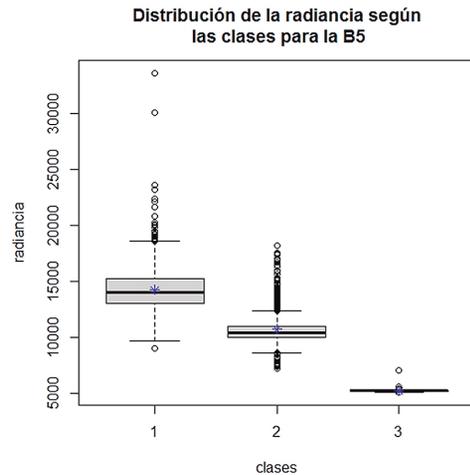


Figura 3. Diagramas de cajas para las tres clases en la banda 5 y 6.

Tabla 4. Estadísticos por bandas, en cada clase, de la Imagen 2002.

	Urbano					No Urbano					Agua				
	Min	Max	Media	D. Estándar	C.V. (%)	Min	Max	Media	D. Estándar	C.V. (%)	Min	Max	Media	D. Estándar	C.V. (%)
B1	77	128	84,999	4,811	5,660	73	109	83,212	3,770	4,530	83	106	89,179	2,930	3,280
B2	56	111	68,331	6,153	9,004	55	99	64,628	4,440	6,870	59	84	63,751	2,690	4,220
B3	44	139	67,189	13,052	19,426	41	132	56,694	8,943	15,774	54	92	58,632	3,169	5,401
B4	47	101	77,049	6,253	8,117	40	118	78,010	10,409	13,343	19	83	23,707	4,821	20,336
B5	50	195	100,950	19,518	19,334	43	176	81,746	17,286	21,146	11	126	16,303	7,815	47,935
B6	24	151	65,385	19,882	30,407	24	134	44,316	13,713	30,944	9	97	13,690	5,107	37,305

más bajos, coincidente con la manera que se refleja el agua, las clases Urbano y No Urbano presentan mayor variabilidad y puntos extremos. Así también, para estas bandas no existe superposición entre las cajas, esto indica que hay diferencias entre las clases, ayudando para la clasificación.

En la Figura 4, los gráficos de líneas múltiples, representan las medias de cada clase para cada banda. Para asegurar la separabilidad de las clases por lo menos una de las bandas debe tener las medias separadas, tal como se observan en las bandas 5 y 6.

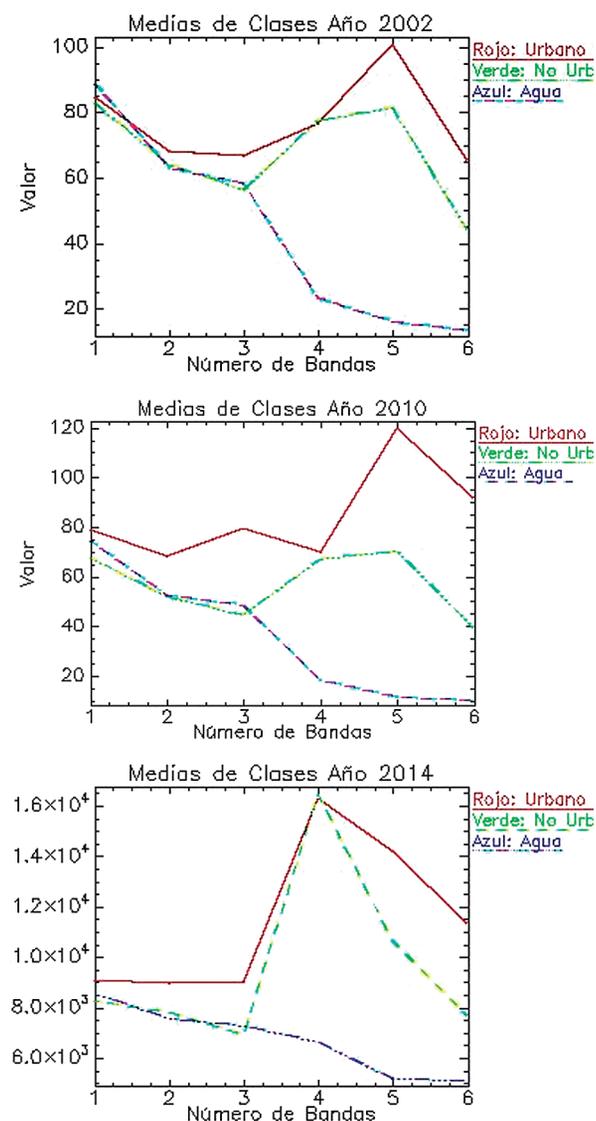


Figura 4. Gráficos de Líneas Múltiples de cada clase.

Es importante considerar las relaciones existentes entre pares de bandas, puesto que indica el grado de información original que aporta cada una, donde se calcularon los valores de los coeficientes de correlación lineal estimado (Coeficiente de Correlación Lineal de Pearson) para todos los pares de bandas. Los coeficientes de correlación estimados más altos para el año 2002, ocurrieron entre las B1 y B2 ($r=83\%$), entre B2 y B3 ($r=86\%$) y también entre

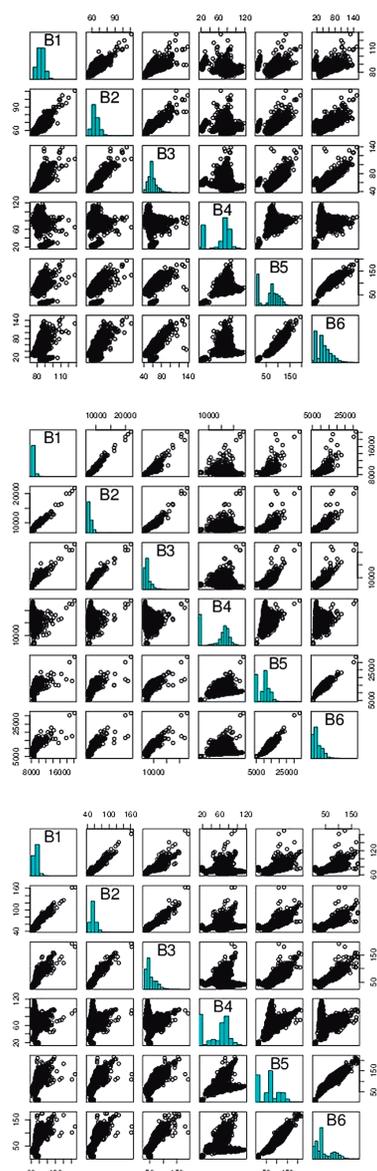


Figura 5. Diagramas de dispersión entre pares de bandas.

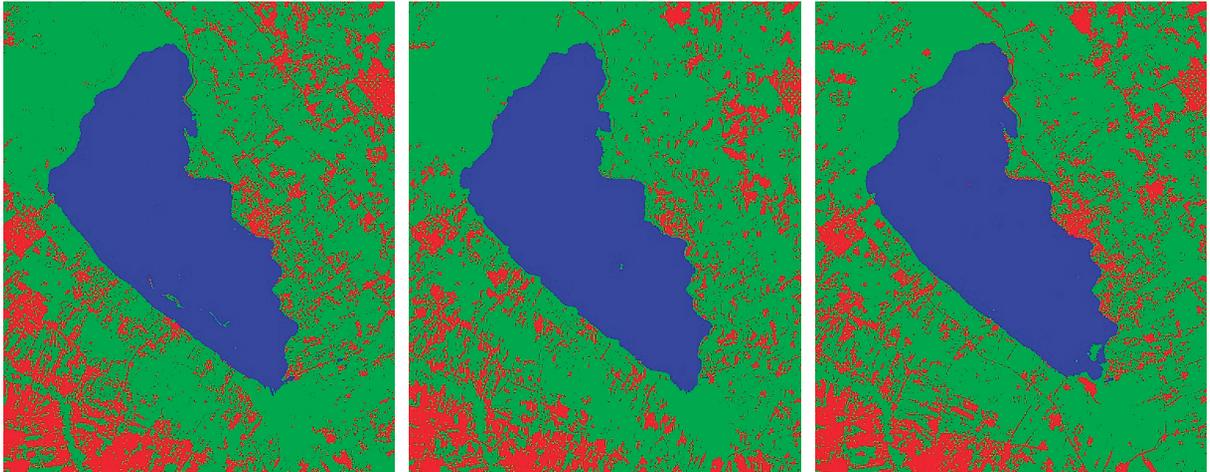


Figura 6. Mapa Temático obtenido con clasificación de Máxima Verosimilitud.

B5 y B6 ($r=87\%$), éste mismo comportamiento se mantiene para los años 2010 y 2014. Mientras que la B4 presenta coeficientes de correlación bajos para todas las bandas. Este comportamiento se repite, en las muestras del año 2010 y 2014.

Finalizado todo el análisis descriptivo se puede concluir que las muestras son de buena calidad y se pasa a la siguiente fase, utilizándolas para entrenar al clasificador.

Clasificación de las tres imágenes por el método Máxima Verosimilitud Gaussiana

Se utilizan las muestras para entrenar al clasificador y comenzar la fase de clasificación propiamente dicha. Se procedió a aplicar el algoritmo MVG

para cada una de las fechas, completando la fase de producción. Se obtuvieron los mapas temáticos respectivos, que se muestran en la Figura 6. Se puede ver que los píxeles de color rojo fueron clasificados como Urbano, verde la clase No Urbana y azul la clase Agua, más adelante se analizará la evolución de las mismas en el tiempo.

Validación de los resultados obtenidos

En la última fase de verificación, con las muestras test seleccionados que representan la verdad del terreno y las muestras de entrenamiento detallados en Tabla 5, se generó la matriz de confusión para cada mapa temático obtenido con el clasificador que se detalla en la Tabla 6.

Tabla 5. Categorías utilizadas para la determinación de las diferentes clases

Nro.	Clases	Color para la clase	Nro. de píxeles en la muestra	Descripción
1	TUrbano	Rojo	308	Terrenos destinados a la urbanización
2	TNo Urbano	Verde	501	Áreas bajas, sujetas a inundaciones, zona agropecuaria y bosques
3	Tagua	Azul	557	Lagunas de pequeña extensión y el Lago Ypacaraí
Total			1.366	

Tabla 6. Matrices de Confusión correspondientes a cada imagen clasificada.

Matriz de Confusión 2002					Matriz de Confusión 2010					Matriz de Confusión 2014				
	1	2	3	Total		1	2	3	Total		1	2	3	Total
1	214	39	0	253	1	287	6	0	293	1	278	22	1	301
2	94	462	0	556	2	21	495	0	516	2	30	479	0	509
3	0	0	557	557	3	0	0	557	557	3	0	0	556	556
Total	308	501	557	1366	Total	308	501	557	1366	Total	308	501	557	1336

Análisis visual multitemporal

Analizando visualmente los mapas temáticos de la Figura 6 para los años 2002, 2010 y 2014, en la zona urbana de la Ciudad de San Bernardino se observó un acentuado crecimiento a través de los años, como así también hacia el sur de la misma.

En la superficie del lago se notan modificaciones en todas las fechas y en el extremo inferior se visualizan cambios en la forma del lago. En la esquina inferior izquierda hay modificaciones como se puede observar en las manchas rojas y verdes. La esquina superior derecha del mapa cambia de una fecha a otra, tanto en las zonas de color rojo como verde; si lo comparamos con el año 2002, se puede observar mayor concentración en las zonas de color rojo.

Resultados de la Etapa II

El propósito del análisis es identificar cambios en la calidad del agua, por lo cual se ha clasificado nuevamente dos imágenes (2002 y 2014), considerando

Tabla 7. Fiabilidad Global y Coeficiente Kappa.

Año 2002	Año 2010	Año 2014
Fiabilidad Global %	Fiabilidad Global %	Fiabilidad Global %
90,264	98,023	96,120
Coeficiente Kappa %	Coeficiente Kappa %	Coeficiente Kappa %
84,850	96,944	94,010

nuevas clases, de acuerdo a la Tabla 8.

Para realizar una comparación entre tipos de aguas se consideró dos clases y se seleccionó nuevas muestras, por un lado muestras de la costa oeste y otra del centro del lago; las mismas fueron seleccionadas mediante muestreo sistemático; además de dos clases denominadas Fuera del lago y Humedal. Siguiendo con las fases de la Etapa I,

Tabla 8. Categorías utilizadas para la determinación de las diferentes clases.

Nro.	Clases	Color para la clase	Nro. de píxeles en la muestra	Descripción
1	Agua 1	Azul	333	Agua de la costa oeste
2	Agua 2	Gris	360	Agua del centro del lago
3	Fuera del lago	Rojo	1.668	Terrenos destinados a la urbanización y bosques
4	Humedal	Naranja	390	Áreas bajas, sujetas a inundaciones
Total			2.058	

se realizó el análisis exploratorio para cada una de las clases, de forma que se garantice la representatividad y separabilidad de las mismas. Con estas muestras se aplica el algoritmo MGV obteniéndose los mapas temáticos de cada imagen, tal como se observa en la Figura 7.

En el 2002 se observa que la clase de tipo Agua 1 está altamente concentrada en la costa oeste, mientras que en el año 2014, esta clase se dispersa tanto por arriba, abajo y en centro del lago. En el primer mapa la superficie que ocupa la clase Humedal, es menor con respecto a la del año 2014.

A partir de las imágenes clasificadas, se emplearon las dos técnicas de detección de cambios mencionadas en la sección Metodología. En la Figura 8 se muestran los mapas obtenidos.

La Figura 8 (a) muestra el mapa que se corresponde con la primera técnica de detección de cambios donde se realizaron las diferencias entre las categorías de las dos imágenes clasificadas. En cada una tenemos números entre 1 y 4, ya que hay cuatro clases. Al realizar las diferencias píxel a píxel, se obtiene diferencias positivas, negativas o ceros cuando las dos clases son iguales. Obtener ceros indica que no hubo cambios y se corresponde con el color gris en el mapa. El color rojo representa los cambios ocurridos del 2002 a 2014; esto significa que no estaba presente en 2002, mientras que el color azul indica los cambios del 2014 al 2002, esto es, estaba presente en el 2002 y no en el 2014.

La Figura 8 (b) muestra el mapa que se obtiene en la composición RGB de las imágenes clasificadas en el 2002, la clasificada en el 2014 y luego la clasificada 2002. Se observan distintas tonalidades por ejemplo el color rosado corresponde a lo que había en el 2002 y en el 2014 cambió, el mismo se puede notar en el extremo inferior del lago. Con el color verde ocurre a la inversa, esto es lo que hay en el 2014 y cambia con respecto al 2002. Los colores negro y gris, representan las zonas estables o donde no se produjeron cambios.

En la Tabla 9 matriz de cambios se observan las zonas estables y dinámicas, además de indicar la clase de la fecha 2002 y la del 2014 de una escena que permite indicar las tendencias del cambio en

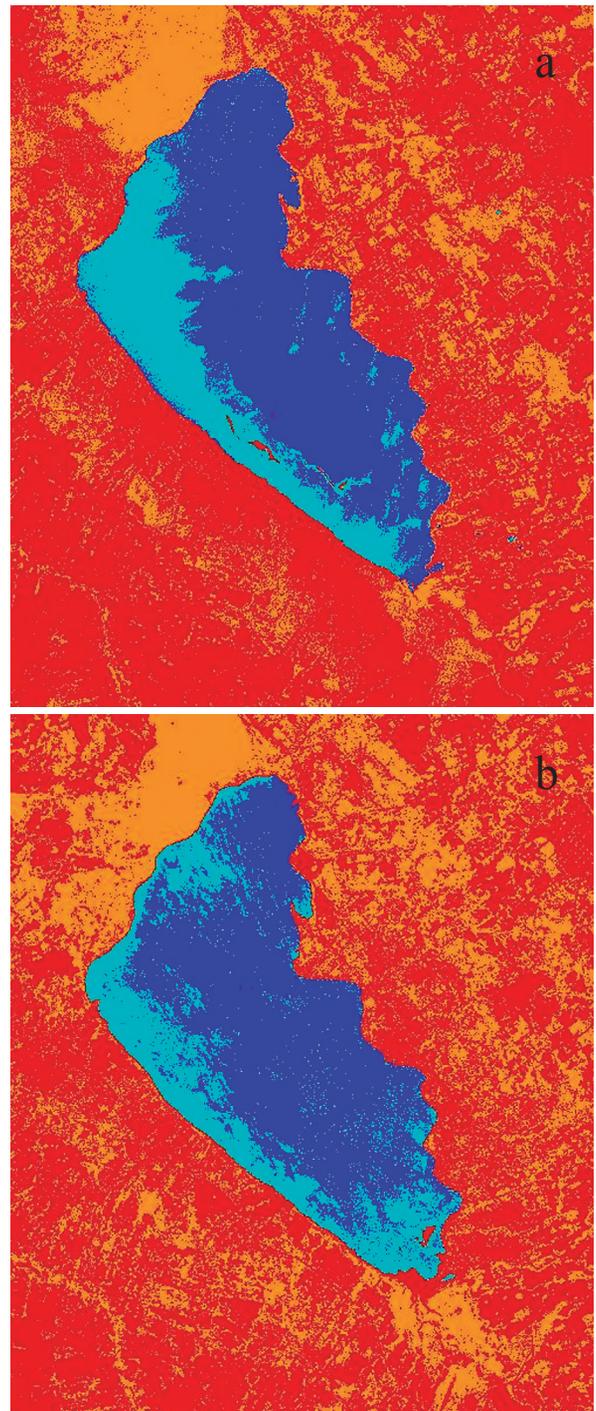


Figura 7. Imágenes clasificadas. **a)** Mapa Temático año 2002. **b)** Mapa Temático año 2014.

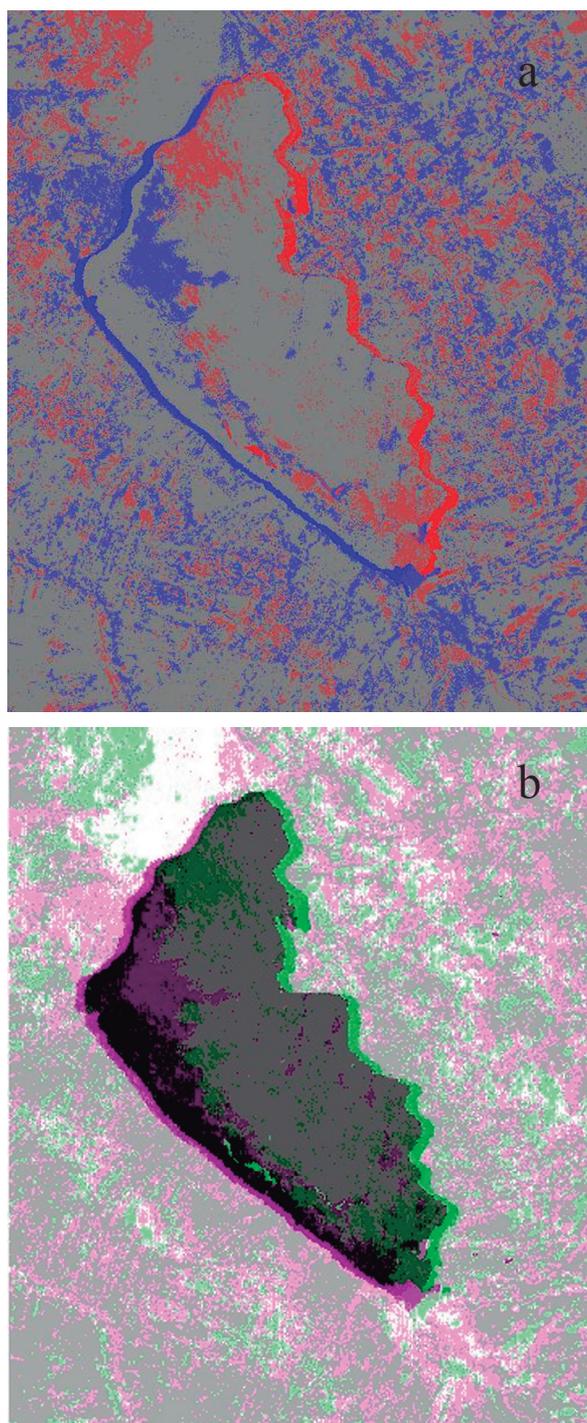


Figura 8. Mapas Temáticos. **a)** Diferencia de Imágenes Clasificadas 02-14. **b)** Composición a color RGB 212.

el área de estudio.

Los porcentajes de la Tabla 9 están calculados respecto de los totales por columna; es decir, respecto al año 2002 como fecha de referencia. Los elementos de la diagonal representan los porcentajes de píxeles que se corresponden en el año 2002 y 2014; por ejemplo 56,5% de los píxeles fueron de la clase Agua 1 en las dos fechas. Los elementos fuera de la diagonal indican las variaciones respecto al 2002, así el 41,7% que en el 2002 era la clase Agua 1, en el 2014 son la clase Agua 2, el 37,7% de los píxeles que en el 2002 eran de Humedal, en el 2014 están clasificados como Fuera del Lago

Tabla 9. Matriz de Cambios del análisis de dos imágenes (en porcentajes).

		Año 2002			
		Agua 1	Agua 2	Fuera del lago	Humedal
Año 2014	Agua 1	56,497	17,806	0,476	0,423
	Agua 2	41,730	80,012	0,117	0,061
	Fuera del lago	1,749	2,141	71,723	37,747
	Humedal	0,024	0,041	27,684	61,768
	Total Clases %	100	100	100	100

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio, aplicando el método de clasificación supervisada de MVG, han demostrado que las imágenes Landsat pueden ser utilizadas de una forma fiable y económica para detectar y analizar cambios en los usos del suelo, como así también para la elaboración de un mapa temático con una exactitud aceptable y de bajo costo.

Comenzando con la clasificación en la primera fase de entrenamiento, se analizó gráfica y numéricamente la calidad de las muestras de entrenamiento, consiguiendo que fueran representativas de cada clase y que hubiera separabilidad entre ellas.

Una vez clasificadas las tres imágenes (2002, 2010 y 2014), se procedió a validar las mismas

utilizando las *muestras test*. En cada de una de las imágenes las matrices de confusión generadas arrojaron buenos resultados, considerando que la mayor parte de los píxeles se ubicaron en la diagonal principal.

Las medidas de Fiabilidad Global y el Coeficiente de Concordancia Kappa, arrojaron valores alrededor del 90%, lo cual es un buen indicador de que los mapas temáticos obtenidos son de buena calidad.

Para el mapa temático del año 2002, sus coeficientes de Fiabilidad y Kappa fueron valores un poco menores que para 2010 y 2014. Los porcentajes de error del mapa más altos ocurrieron para el 2002. Como en general, los resultados de validación fueron buenos, se considera que las clasificaciones son de buena calidad.

El análisis multitemporal visual para las tres fechas permite detectar los cambios producidos en cada una de las clases analizadas, mostrando modificaciones en lo urbano, lo no urbano y en la forma del extremo inferior del lago.

Con la finalidad de analizar en forma más detallada el estado del agua del lago, se definieron nuevas muestras de entrenamiento, dos clases de tipo de agua y dos clases fuera de ella (Fuera del Lago y Humedal) en dos fechas 2002 y 2014. Completadas las fases de clasificación para cada fecha se aplicaron las dos técnicas de detección de cambios, utilizadas en este trabajo permitieron identificar áreas donde no se produjeron cambios, áreas presentes en el 2002 y no en el 2014 y a la inversa.

Los cambios producidos se determinan por diferencia en los colores en los mapas generados y numéricamente la matriz de cambios confirma lo observado visualmente.

La elaboración de mapas temáticos, mediante las técnicas aplicadas fueron eficientes para identificar los cambios producidos en las fechas analizadas, conforme a lo planteado en la hipótesis de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A la Profesora MSc. Susana Beatriz Ferrero por su apoyo, orientación y confianza durante mi trabajo

de tesis, que sin su ayuda y conocimientos no hubiese sido posible realizar este proyecto.

A la Profesora MSc. Elsa Ester Moschetti por sus oportunas y valiosas observaciones que enriquecen este trabajo.

Al Profesor Dr. Oscar Bustos, que me ha brindado la oportunidad de realizar una pasantía en la Facultad de Matemática Astronomía y Física de la Universidad Nacional de Córdoba, y de esta manera incursionar en el área de teledetección.

LITERATURA CITADA

- Arango G., M., Branch B., J. W. & Botero F., V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: Landsat ETM+. *Scielo*, 58(1). Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472005000100004. (Consultado: 2015, Marzo 10).
- Bustos, O. H., Frery, A. C., Lamfri, M. A. & Scavuzzo, C. M. (2004). Técnicas Estadísticas en Teledetección Espacial. SINAPE (Simposio Nacional de Probabilidad e Estadística). Brasil.
- Chuvieco, E. (2010). Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra desde el espacio. 3a ed., Ariel. Madrid, España.
- Congalton, R. G. & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. 2a ed. Taylor & Francis Group.
- Cortijo, F. J. (1995). Un estudio comparativo de métodos de Clasificación de Imágenes Multibanda (Tesis doctoral). Universidad de Granada. Granada, España.
- Cuadras, C. M. (2007). *Nuevos Métodos de Análisis Multivariante*. 1a ed. Manacor. Barcelona, España.
- Ferrero, S. B. (2004). Evaluación de Clasificaciones Máxima Verosimilitud Gaussiana y de Modas Condicionales iteradas para imágenes ópticas multispectrales (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.

- Francois M., J., Reyes D. & Pérez V., A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. Núm. (51), pp. 53-72. México. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56905105>. (Consultado: 2015, Febrero 4).
- González, R. C. & Woods, R. E. (1996). *Tratamiento digital de imágenes*. Adison-Wesley (Ed.), pp (773).
- Jensen, J. R. (2005). *Introductory Digital Image Processing A Remote Sensing Perspective*. Prentice Hall Series.
- Johnson, D. E. (1998). *Métodos multivariados aplicados al análisis de datos*. Thomson Editores. México, México.
- Johnson, R. A. & Wichern, D. W. (2007). *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall.
- Perez G., C. & Muñoz N., A. L. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca. Disponible en: <https://books.google.com.py/books?id=SfrGxbO1DT0C&printsec=frontcover&dq=Perez+Gutiérrez,+C.> (Consultado: 2014, Noviembre 21).
- Richards, J. A. Y Jia, X. (1999). *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. 3a ed.
- Sobrino, J. (2000). *Teledetección. Ilustrada*. Valencia. Universitat de València.

CARACTERIZACIÓN DE LA IRRADIANCIA ERITÉMICA DIARIA BASADA EN MODELOS DE SERIES TEMPORALES Y DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE UV EN EL DEPARTAMENTO CENTRAL DEL PARAGUAY

CHARACTERIZATION OF THE DAILY ERYTHEMIC IRRADIANCE BASED ON TIME SERIES MODELS AND DETERMINATION OF UV INDEX IN THE CENTRAL DEPARTMENT OF PARAGUAY

VIVIANA ISABEL DÍAZ ESCOBAR¹

¹Departamento de Estadística. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. E-mail: viviana1712@gmail.com

Resumen: Las radiaciones solares ultravioletas (UV) son las más energéticas que llegan a nivel de la superficie terrestre, produciendo acciones biológicas de importancia. En esta investigación se analizaron series de valores máximos diarios de irradiancia eritémica, utilizando técnicas de análisis de series temporales, para estimar modelos que caractericen el comportamiento de dicha variable, realizar predicciones y determinar los índices UV para el departamento Central del Paraguay. Los registros fueron obtenidos mediante un piranómetro UVB-1 de la marca YES en el Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la FACEN - UNA. Se presentan ciclos anuales desde el año 1997 hasta finales de 2011 de los valores máximos diarios de irradiancia eritémica. La serie de valores máximos diarios de radiación ultravioleta eritémica (UVER) fue ajustada mediante el método de descomposición clásica, utilizando un modelo aditivo, en el cual fueron consideradas las componentes: tendencia, estacional y aleatoria. Fueron obtenidos pronósticos de la variable estudiada. Las dosis diarias máximas de UVER se observan en los meses estivales. Los pronósticos diarios de los índices UV se obtienen a partir de las predicciones de valores máximos diarios de UVER, de acuerdo con los criterios actuales recomendados por las organizaciones internacionales. Las estimaciones del índice UV, que se alcanza en las horas centrales del día, oscila entre valores máximos de 8 - 11 durante los meses estivales y valores entre 2 - 5 en los meses de invierno. De este modo es posible informar acerca del comportamiento de la irradiancia eritémica, así como sobre el índice UV y alertar a la población sobre el nivel de radiación ultravioleta esperado, considerando la escasez de información relacionada a estos temas.

Palabras claves: irradiancia eritémica, índice UV, series temporales, descomposición clásica, modelos ARMA.

Abstract: The ultraviolet Solar radiations are the most energetics arriving to the earth's surface, producing important biological effects. In this research analyzes series of daily maximum values of erythemic irradiance by using temporal analysis techniques to estimate models that characterize the behavior of this variable, to make forecasts and to determine the UV index for the Central department of Paraguay. Data were obtained using a pyranometer UVB-1 of the YES brand located at the Laboratory of Atmospheric Investigation and Environmental Issues (LIAPA) of the School of Natural and Exact Sciences (FACEN) of the National University of Asuncion (UNA). Yearly cycles from 1997 until the end of 2011 of the daily maximum values of erythemic irradiance are shown. The series of daily maximum values of ultraviolet erythemic radiation (UVER) was fitted by classical decomposition methods, using additive model and considering the following components: trend, seasonal and random. Forecasts values of the variable were obtained. The highest levels of UVER were obtained during the summer months. The daily forecasts of UV indexes were obtained from the predictions of daily maximum values of UVER, according to the current criteria recommended by international organizations. The maximum values for UV index estimates, which are reached at central hours of the day, ranges in between 8 - 11 during summer months and in between 2 - 5 during winter months. Therefore, it is possible to report about the erythemic irradiance behavior, as well as the UV index and alert the general public about the expected level of ultraviolet radiation, despite the paucity of information related to these issues.

Keywords: erythemic irradiance, UV index, time series, classical decomposition, modelos ARMA.

INTRODUCCIÓN

Las radiaciones solares ultravioletas son las más energéticas que llegan a nivel de la superficie terrestre por fotón incidente y en consecuencia producen acciones biológicas de importancia sobre materiales y sustancias. La energía de estos fotones, particularmente los ultravioleta B (UVB), es suficientemente alta como para romper ligaduras de las moléculas que componen ciertas sustancias expuestas a esta radiación. Entre ellas, la de mayor significación es la molécula de ADN, íntimamente relacionada con los seres vivos, que tiene su máximo de acción biológica debida a la radiación solar en el entorno 305-310 nm (nanómetros) (Jagger, 1985).

La radiación solar ultravioleta tiene efectos nocivos sobre los organismos vivos. En particular estos efectos se manifiestan en los seres humanos principalmente sobre la piel, pero también pueden actuar sobre los ojos o incluso sobre el sistema inmunológico (Diffey, 1991). De estos efectos el más común es el eritema o quemadura solar cuyo espectro de acción muestra un máximo absoluto en los 297 nm (McKinlay y Diffey, 1987).

El índice ultravioleta ha adquirido recientemente un alto interés como consecuencia de la disminución del contenido de ozono estratosférico y el consiguiente aumento de la radiación UVB y sus efectos nocivos sobre la población (Marín *et al.*, 2003).

En este trabajo se estudian las características de las series de valores máximos diarios de irradiancia eritémica en el departamento Central del Paraguay, correspondientes al periodo 1997-2011; además se obtiene la estimación del índice UV para la zona. Todo ello se lleva a cabo mediante la optimización de diferentes técnicas de análisis de series temporales.

Las series de tiempo poseen características diferentes de la mayoría de los métodos estadísticos utilizados para tratar temas referentes al área ambiental o climatológica. La suposición básica que soporta el análisis de series temporales es que los factores que han ocasionado patrones o tendencias en el pasado y en el presente continuarán haciéndolo, más o menos de la misma forma en el futuro.

Por lo tanto, los principales objetivos del análisis de series temporales consisten en identificar y aislar tales factores de influencia con el propósito de realizar proyecciones, es decir, estimar los valores futuros de la variable en estudio.

En general, la temática de la radiación solar ultravioleta y los riesgos de exposición al sol han adquirido una importancia especial, considerando que la actividad del hombre está efectivamente alterando el medio físico del planeta. En efecto, hoy no solamente existe evidencia acumulada sobre los cambios globales - climáticos, sino también un extenso marco legal adoptado por la comunidad internacional para evitar mayores impactos negativos incluyendo los posibles riesgos a la salud.

Asimismo, ante la disminución de la capa de ozono y el consecuente incremento de la radiación solar ultravioleta que alcanza la superficie terrestre, la sociedad demanda información e investigación en torno a esta problemática, así como medidas preventivas basadas en los resultados de estos estudios.

Basado en estos argumentos, la problemática que se encara en este trabajo de investigación es la escasez de información sobre el comportamiento de la irradiancia eritémica, así como también acerca del índice UV en el departamento Central, considerando los efectos nocivos que pueden causar a la población en general la exposición prolongada a los rayos solares.

Existen evidencias experimentales del progresivo deterioro que ha sufrido la capa de ozono estratosférico a partir de la década de los 80 (Bojkov y Fioletov, 1995; Fioletov *et al.*, 2002).

Rivas *et al.* (2011) afirman que cada año en el hemisferio sur, a comienzos de la primavera, sobre la región antártica se produce la destrucción del mayor porcentaje de ozono estratosférico del planeta, lo cual ha disminuido el espesor de la capa de ozono en todas las latitudes. Por consiguiente, es factible el incremento de los niveles de UVB que llegan a la superficie terrestre, lo cual hace que sea de vital importancia el seguimiento de la evolución del comportamiento de la radiación solar ultravioleta, en particular de la irradiancia eritémica, ya que es posible que el incremento de los mismos tengan

importantes consecuencias sobre los seres vivos, debido principalmente al aumento de los niveles de radiación solar ultravioleta B (UVB: 280-320 nm) atenuada por la capa de ozono (Madronich y Flocke, 1997).

Normalmente la información del índice UV se proporciona con indicación de los valores alcanzados previamente, pero también sobre los valores alcanzables en los días posteriores, para lo cual se precisa la utilización de algún modelo de predicción. Precisamente esta posibilidad de predicción de valores es lo que hace que el índice adquiera su valor práctico pudiéndose así convertir en una herramienta eficaz para informar a la población sobre los riesgos que cabe esperar en un día determinado (Marín *et al.*, 2003).

El propósito principal de esta investigación es estimar un modelo de series temporales que caractericen el comportamiento diario de los valores máximos de irradiancia eritémica, permitiendo pronosticar sus valores en el futuro y determinar los índices UV para el departamento Central del Paraguay.

De esta forma, el estudio que se presenta permite caracterizar la radiación solar eritémica, en una importante región del Paraguay, como es el departamento Central. Así mismo, se considera la relevancia que puede tener una investigación utilizando diversas técnicas de series temporales, para la estimación de los parámetros de modelos que permitan caracterizar el comportamiento de los valores máximos diarios de irradiancia eritémica en la zona estudiada.

Mediante la obtención de dichos modelos será posible realizar predicciones de los valores de la variable estudiada, además de pronosticar los índices UV para dicha zona, contribuyendo de esa manera a que los habitantes de la misma y la sociedad en general puedan acceder a informaciones sobre el tema en cuestión y se fomente el aumento de campañas de concienciación sobre los riesgos de exposición a la radiación solar.

MATERIALES Y MÉTODOS

La población de estudio es el conjunto de datos de

irradiancia eritémica, registrados en el Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN) de la Universidad Nacional de Asunción (UNA). Los datos de UVER fueron almacenados en planillas electrónicas EXCEL. La base cuenta con registros de irradiancia eritémica (mW/m^2) promediados cada 15 minutos y con las siguientes informaciones: año, mes, día, día juliano, valores mínimos horario y diario, valores máximos horario y diario, promedio horario y diario, desviación estándar horaria y diaria, número de datos por hora y día, horas en que se registraron los valores mínimos y máximos de cada intervalo horario y del día.

La muestra constituye la base de datos de irradiancia eritémica, en formato digital, correspondientes al periodo 1997 - 2011, facilitada por el LIAPA de la FACEN - UNA. Se analizaron los valores máximos diarios registrados alrededor del mediodía local.

Los datos de UVER han sido registrados con el sensor de radiación ultravioleta modelo UVB-1 de la marca YES (*Yankee Environmental Systems*) que se encuentra instalado en la estación del LIAPA de la FACEN - UNA. La institución está ubicada en el Campus Universitario de la ciudad de San Lorenzo (Latitud: 25,20°S, Longitud: 57,31°O, Altitud: 123 m.snm).

El sensor UVB-1 es un radiómetro de precisión que mide la radiación solar UVB y la UVER en mW/m^2 . Es un instrumento de banda ancha cuyo intervalo espectral abarca las longitudes de onda comprendidas entre 280 y 320 nm (región ultravioleta B) con una respuesta de coseno superior al 5% para valores del ángulo cenital inferiores a 60°. El UVB-1 es un aparato muy robusto especialmente diseñado para asegurar su estabilidad durante largos periodos de tiempo sin mantenimiento, lo que lo hace idóneo para medidas de campo continuas y a la intemperie. El sensor se encuentra estabilizado a una temperatura de 40°C. El mismo fue instalado en la estación del LIAPA en julio de 1996 y fue calibrado por última vez en noviembre de 2010.

La recolección de datos es continua durante las

24 horas del día, todos los días del año. Los datos fueron grabados en promedios cada 15 minutos. Las mediciones del instrumento corresponden directamente a irradiancia eritémica, es decir, según el espectro de acción de la piel definido por McKinlay y Diffey (1987).

Dado que no es posible realizar la manipulación de los datos de manera arbitraria en cuanto a sus valores, puesto que éstos son fijos, ya que son los registros históricos de la serie de tiempo de la irradiancia eritémica medida en el Campus Universitario de San Lorenzo, este estudio no es experimental sino observacional. Además, como el objeto de estudio es una serie de tiempo, el análisis es en consecuencia longitudinal. Inherentemente este estudio es diacrónico puesto que se usan los datos históricos, mismos que se emplean para predecir los valores de la serie en el tiempo.

Los datos considerados son los registros históricos de irradiancia eritémica, debido a que se quiere mostrar la aplicación de las técnicas de análisis de series temporales a este tipo de fenómenos. Se consideraron los registros dentro del periodo del 1 de enero de 1997 al 31 de diciembre de 2011. Se utilizaron técnicas estadísticas de análisis de series temporales, dado que los registros de irradiancia eritémica fueron tomados a través del tiempo y bajo las mismas condiciones. Para el análisis y procesamiento de los datos se ha utilizado el software R-project, versión R 2.11.1.

El análisis exploratorio de la serie de irradiancia eritémica consiste en detectar, por medios gráficos, la homogeneidad de la serie y la existencia o no de alguna tendencia y/o cambio, estacionariedad y estacionalidad. Se representa el plot de la serie y se observa si es estacionaria, es decir, si presenta media y varianza constantes. Si la serie no es estacionaria habría que transformarla tomando logaritmos para estabilizar la varianza, y/o diferenciaciones para estabilizar la media (diferencia regular).

La base de datos que compone la muestra del presente estudio, corresponde a registros de irradiancia eritémica y se inicia el 1 de enero de 1997. Los valores máximos de UVER muestran un comportamiento estacional muy característico.

Con relación al componente estacional, la irradiancia eritémica alcanza su mayor nivel en los meses de verano, siendo enero y febrero los meses más predominantes de cada año.

En este contexto, es posible modelar la serie diaria de valores máximos de irradiancia eritémica utilizando el método de descomposición clásica, analizando las componentes de tendencia y estacionalidad, así como la componente aleatoria. Se buscará extraer la estacionalidad y la tendencia (en caso de comprobarse que esta es significativa), para luego obtener la componente aleatoria, que constituiría una serie estacionaria a ser ajustada mediante modelos del tipo ARMA (p, q) o su equivalente ARIMA ($p, 0, q$), siguiendo los pasos de la metodología propuesta por Box y Jenkins (1976).

Posteriormente se procede a la validación de cada modelo, para ello se comprueba si los parámetros de los mismos son significativos, mediante el cálculo de los intervalos de confianza de dichos parámetros.

En el modelo seleccionado, se calculan los residuos y mediante el ACF y PACF, se comprueba si éstos se comportan como un ruido blanco, que es un requisito de partida del modelo. También se utiliza el test de Box-Ljung para comprobar la ausencia de autocorrelaciones entre los residuos. En este caso, el modelo es adecuado y se está en condiciones de realizar la predicción.

Una vez hecho el procedimiento descrito anteriormente, se pueden realizar predicciones de los niveles de irradiancia eritémica, y por consiguiente, estimaciones de los valores del índice UV en el futuro, calculando también sus correspondientes intervalos de confianza.

Las técnicas de pronóstico de series de tiempo por los métodos estadísticos tradicionales permiten llevar a cabo la obtención de predicciones, como por ejemplo, por medio de la metodología Box-Jenkins, la cual permite obtener buenas aproximaciones, ya que esta metodología tiene una parte de arte en el sentido de que el proceso es iterativo hasta alcanzar el mejor modelo de acuerdo a la experiencia del investigador.

Los pasos a seguir para obtener las prediccio-

nes con los modelos de series temporales son los siguientes: a) Análisis de la serie, b) Identificación y elección del modelo a emplear, c) Estimación de los parámetros del modelo, d) Validación del modelo, e) Predicción.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la serie de valores máximos diarios de UVER

La serie de valores máximos diarios de irradiancia eritémica se presenta en la Figura 1. Se observa claramente que existe una variación estacional en el comportamiento de los valores de la serie, se registra un “pico” en cada verano y una “depresión o caída” en todos los inviernos.

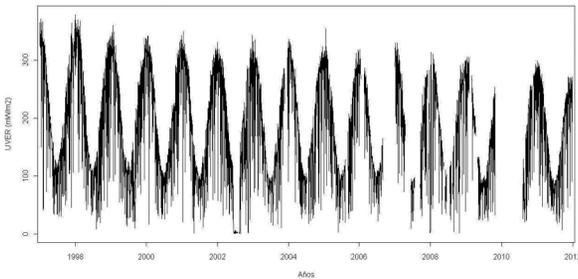


Figura 1. Valores máximos diarios de UVER, 01/1997-12/2011.

El gráfico muestra además que la serie no es estacionaria en media, ya que existe una leve tendencia decreciente que empieza a notarse aproximadamente en el mes de enero del año 2000. Cabe destacar que la variabilidad parece no aumentar con el tiempo y tampoco con el nivel de la serie. Esta serie temporal puede ser descrita mediante un modelo aditivo, ya que las fluctuaciones estacionales son

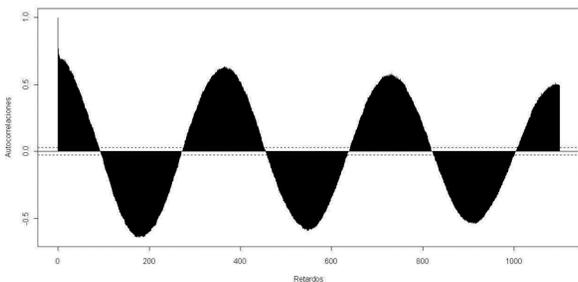


Figura 2. Función de autocorrelación de la serie de valores máximos diarios de UVER.

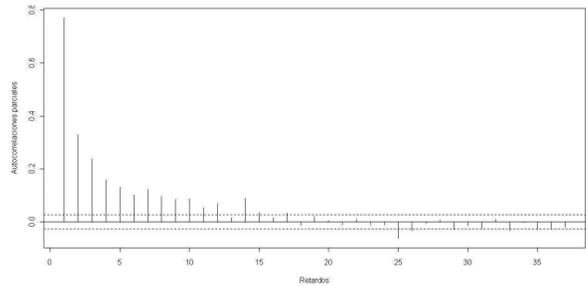


Figura 3. Función de autocorrelación de la serie de valores máximos diarios de UVER (lag max = 1100).

más o menos constantes en el tiempo y no parecen depender del nivel de la serie y las fluctuaciones aleatorias también se muestran constantes con el tiempo.

En las Figuras 2 y 3, correspondientes a la estimación de la función de autocorrelación de la serie de valores máximos diarios de irradiancia eritémica, se observa que los coeficientes decaen en forma de onda seno-coseno amortiguada; en la parte regular los mismos presentan un decrecimiento lento y gradual, además, en los retardos 365, 730, 1095 se nota un decrecimiento lento de los coeficientes, indicando la presencia de un componente estacional de período 365.

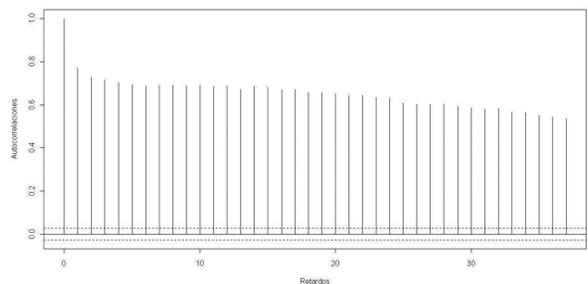


Figura 4. Función de autocorrelación parcial de la serie de valores máximos diarios de UVER.

La función de autocorrelación parcial de la serie de valores máximos diarios de UVER, se presenta en la Figura 4. Se observa que varios coeficientes son significativos, además los mismos decrecen rápidamente.

Se estimaron las componentes de la serie mediante el método de descomposición clásica. En efecto, se ha considerado un modelo aditivo (1)

que represente a la serie original, para después eliminar las componentes de tendencia y estacional, quedando únicamente la componente residual con la cual se realizó el análisis, siguiendo la metodología Box-Jenkins.

$$X_t = T_t + S_t + Y_t \quad (1)$$

donde: X_t representa el valor máximo de irradiación eritémica (mW/m^2) en el día t , T_t es la componente de tendencia, S_t es la componente estacional, Y_t es una serie estacionaria con media igual a cero que puede ser ajustada mediante un modelo ARMA (p, q).

Para estimar la componente estacional de la serie, se utilizó un filtro de medias móviles de orden 365, dado por la expresión:

$$MMC_t^{365} = \frac{X_{t-182} + X_{t-181} + X_{t-180} + \dots + X_{t+180} + X_{t+181} + X_{t+182}}{365} \quad (2)$$

donde $183 < t < 5293$.

Se calcularon los índices de estacionalidad, que posteriormente fueron reescalados, de manera que la suma de los mismos sea igual a cero, lo que llevó a la estimación de la componente estacional S_t .

Para ajustar la tendencia T_t se utilizó el método de mínimos cuadrados ordinarios. Luego, la componente de tendencia se ha representado a través de:

$$T_t = 196,08 - 0,006 t \quad (3)$$

donde ambos coeficientes son significativos con un 95% de confianza.

Las componentes de tendencia y estacionalidad fueron eliminadas de la serie original, quedando solamente la componente aleatoria, Y_t , representada mediante la expresión:

$$Y_t = X_t - T_t - S_t \quad (4)$$

La serie desestacionalizada y sin tendencia (Y_t) ha sido ajustada mediante un modelo ARMA (p, q). Para determinar los posibles valores de p y q se tuvieron en cuenta los gráficos de la función de autocorrelación simple (ACF) (Figura 5) y de la función de autocorrelación parcial (PACF) (Figura

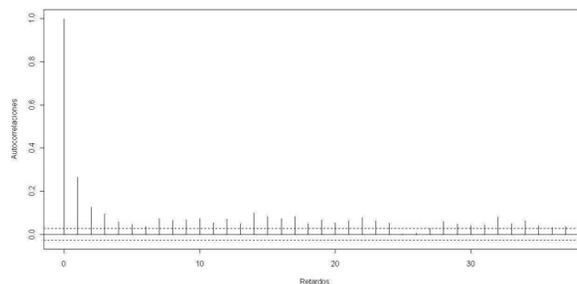


Figura 5. ACF de la serie estacionaria Y_t (desestacionalizada y sin tendencia).

6) de Y_t .

La Figura 5 muestra la función de autocorrelación de la serie estacionaria Y_t . Se observa un decrecimiento rápido de los valores de los coeficientes, lo que sugiere un modelo MA de orden 1 ó 2. La Figura 6 muestra la función de autocorrelación parcial de la serie estacionaria Y_t . Se observan varios coeficientes no nulos, indicando estructura AR que debe ser al menos de orden 2. Cabe destacar además, que son significativos los coeficientes que corresponden a los retardos 7, 14, 25 y 32, para la selección de los valores de p .

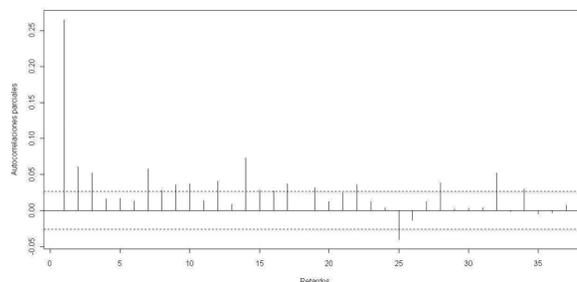


Figura 6. PACF de la serie desestacionalizada y sin tendencia.

En total fueron ajustados sesenta y cuatro modelos ARMA (p, q), tomando todas las combinaciones posibles de valores de p y q , $p \in \{1, 2, \dots, 32\}$ y $q \in \{1, 2\}$. La estimación de los coeficientes de cada modelo fue posible mediante la maximización de la función de verosimilitud. Una vez obtenidos todos los ajustes, se ha utilizado el Criterio Información de Akaike (AIC) y fueron escogidos aquellos modelos con valores de AIC más pequeños. Los mismos se muestran en la Tabla 1.

Considerando la Tabla 1, se ha seleccionado

Tabla 1. Modelos ARMA ajustados con menores valores de AIC.

Modelos ajustados	Valores de AIC
ARMA (25, 2)	49025,58
ARMA (24, 2)	49026,93
ARMA (32, 1)	49028,37
ARMA (32, 2)	49028,42
ARMA (7, 1)	49028,86
ARMA (15, 1)	49029,03
ARMA (14, 1)	49029,30

el modelo ARMA (25; 2) que obtuvo el valor más bajo de AIC = 49025,58. Fueron analizados la significatividad de sus coeficientes, para lo cual se han calculado los intervalos de confianza de los mismos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.

En la Tabla 2 se observa que aparecen varios coeficientes que no son significativos, como los estimados para: ar4, ar5, ar6, ar7, ar8, ar9, ar10, ar11, ar13, ar15, ar18, ar20, ar21, ar22, ar23, ar24 y el intercepto, ya que sus correspondientes inter-

valos de confianza contienen al cero. Luego ha sido seleccionado el siguiente modelo con AIC más bajo, el ARMA (24, 2).

Los coeficientes del modelo ARMA (24, 2) también fueron analizados, mediante el cálculo de sus intervalos de confianza, encontrándose varios coeficientes no significativos. El análisis de la significatividad de los coeficientes fue hecho para todos los demás modelos ajustados con menores valores de AIC (Tabla 1), pudiendo comprobarse que en todos los casos existía determinada cantidad de coeficientes no significativos.

Por tanto, se ajustaron nuevamente los modelos que aparecen en la Tabla 1, teniendo en cuenta solamente aquellos coeficientes que fueron significativos en el primer ajuste, aquellos que no resultaron significativos fueron excluidos. Es decir, se volvieron a ajustar modelos, imponiendo que algunos coeficientes sean cero, y por tanto, utilizando menos coeficientes (modelos más parsimoniosos). En algunos casos se ha considerado un nivel de significación de 0,10 para la selección de

Tabla 2. Coeficientes del modelo ARMA (25, 2) y sus IC.

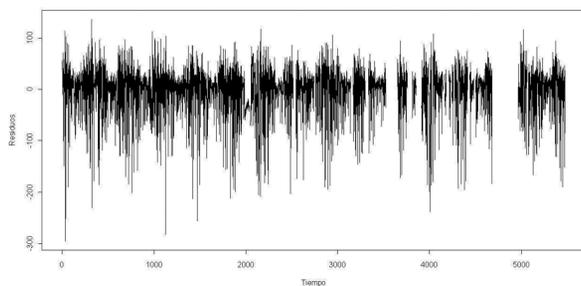
Coef.	Estim.	IC		Coef.	Estim.	IC	
		Li	Ls			Li	Ls
ar1	0,6993	0,4188	0,9798	ar15	-0,0143	-0,0604	0,0318
ar2	-0,7486	-1,0428	-0,4544	ar16	0,0520	0,0294	0,0746
ar3	0,1873	0,1158	0,2588	ar17	0,0539	0,0114	0,0964
ar4	0,0144	-0,0297	0,0585	ar18	-0,0179	-0,0620	0,0262
ar5	0,0285	-0,0150	0,0720	ar19	0,0631	0,0186	0,1076
ar6	-0,0035	-0,0458	0,0388	ar20	-0,0116	-0,0547	0,0315
ar7	0,0380	-0,0043	0,0803	ar21	0,0331	-0,0094	0,0756
ar8	-0,0022	-0,0457	0,0413	ar22	0,0290	-0,0133	0,0713
ar9	0,0346	-0,0085	0,0777	ar23	0,0124	-0,0299	0,0547
ar10	0,0352	-0,0075	0,0779	ar24	0,0329	-0,0081	0,0739
ar11	0,0016	-0,0417	0,0449	ar25	-0,0352	-0,0703	-0,0001
ar12	0,0520	0,0091	0,0949	ma1	-0,4585	-0,7386	-0,1784
ar13	-0,0232	-0,0663	0,0199	ma2	0,6784	0,4216	0,9352
ar14	0,0880	0,0449	0,1311	Intercept	0,3444	-3,4411	4,1299

Tabla 3. Coeficientes del modelo ARMA (32, 1) y sus IC.

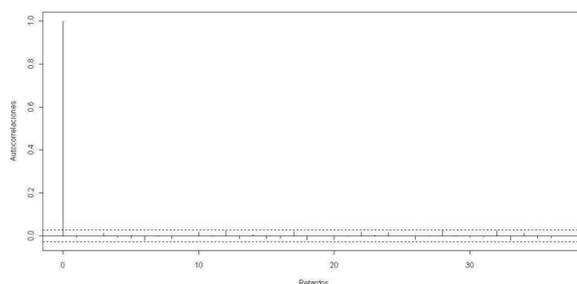
Coef.	Estim.	IC		Coef.	Estim.	IC	
		Li	Ls			Li	Ls
ar1	0,938	0,7651	1,1113	ar25	-0,046	-0,0774	-0,0151
ar2	-0,133	-0,1949	-0,0711	ar26	0,033	0,0011	0,0639
ar7	0,031	0,0082	0,0532	ar32	0,022	0,0010	0,0434
ar14	0,045	0,0201	0,0699	ma1	-0,697	-0,8672	-0,5274
ar19	0,019	0,0004	0,0376				

los coeficientes significativos que fueron incluidos en el nuevo ajuste.

De esta forma, se volvió a utilizar el Criterio de Información de Akaike (AIC), teniendo presente además el principio de parsimonia, y se encontró que el modelo con menor valor de AIC fue el ARMA (32, 1) con un AIC = 49007,99. Este modelo tiene todos sus coeficientes significativos ($\alpha = 0,05$), el coeficiente estimado para ar19 es significativo con un 90% de confianza. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

**Figura 7.** Residuos de la serie estacionaria Y_t .

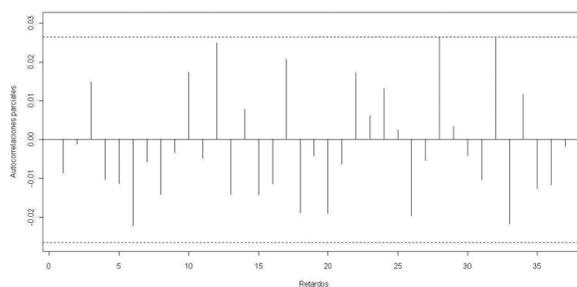
Para la validación del modelo ARMA (32,1) seleccionado, fueron calculados y representados gráficamente los residuos (Figura 7), así como también la ACF (Figura 8) y la PACF (Figura 9) de los mismos. Se observa que los residuos presentan un comportamiento correspondiente a un ruido blanco. Además, puesto que no hay residuales significativos a través de los diferentes retardos, en la ACF ni en la PACF, se puede considerar que no existe autocorrelación entre los residuos, es decir, no queda dependencia serial en los datos a partir

**Figura 8.** ACF de los residuos de la serie estacionaria Y_t .

del modelo estimado.

Para confirmar la ausencia de autocorrelación entre los residuos, se ha ensayado el test de Box-Ljung. Se obtuvo el estadístico $Q = 58,93$ con un p -valor = 0,5148 (los grados de libertad ($g.l.$) del estadístico Q resultan de $g.l. = h - n = 60 - 9 = 51$, siendo h el número de lags considerados y n el número de parámetros estimados), por lo que no se rechaza la hipótesis de que no existe autocorrelación entre los residuos.

El modelo ARMA (32,1) fue validado, puede representarse a través de la expresión:

**Figura 9.** PACF de los residuos de la serie estacionaria Y_t .

$$\begin{aligned}
 Y_t = & 0,938Y_{t-1} - 0,133Y_{t-2} + 0,031Y_{t-7} + \\
 & + 0,045Y_{t-14} + 0,019Y_{t-19} - 0,046Y_{t-25} + \\
 & + 0,033Y_{t-26} + 0,022Y_{t-32} + Z_t - 0,697Z_{t-1}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Luego, la serie de valores máximos diarios de irradiancia eritémica se representa mediante el siguiente modelo:

$$\begin{aligned}
 X_t = & 196,08 - 0,006t + 0,938Y_{t-1} - 0,133Y_{t-2} + \\
 & + 0,031Y_{t-7} + 0,045Y_{t-14} + 0,019Y_{t-19} - \\
 & - 0,046Y_{t-25} + 0,033Y_{t-26} + 0,022Y_{t-32} + \\
 & + Z_t - 0,697Z_{t-1} + S_{tj}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

donde:

- X_t es la estimación del valor máximo de irradiancia eritémica en el día t ,
- Y_{t-i} ($i = 1, 2, 7, 14, 19, 25, 26, 32$) representa la memoria del sistema, es decir, lo ocurrido hasta 32 días en el pasado está correlacionado con el presente,
- Z_t y Z_{t-1} son los términos de ruido blanco o factores externos, y
- S_{tj} es la componente estacional para cada día juliano ($j = 1, 2, \dots, 365$).

El modelo estimado (6) permitió obtener predicciones razonables de los valores máximos diarios de irradiancia eritémica para el departamento Central del Paraguay.

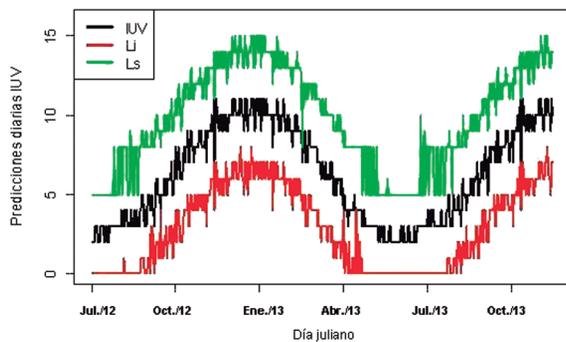


Figura 10. Predicciones de valores máximos diarios de UVER para dos años y sus respectivos intervalos de confianza.

Las predicciones para dos años se presentan gráficamente en la Figura 10 .

Pronósticos de índices UV para el departamento Central del Paraguay

Predicciones diarias del índice UV

Para el cálculo de pronósticos diarios de los índices UV, se consideraron las predicciones obtenidas para valores máximos diarios de irradiancia eritémica (mW/m^2). Se tuvo en cuenta además, que el índice UV es una cantidad adimensional definida como 40 veces la irradiancia eritémica (medida en W/m^2), según ha establecido la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2002). Las predicciones diarias de los índices UV y sus correspondientes intervalos de confianza, para el período comprendido entre Julio 2012 y Diciembre 2013, se presentan gráficamente en la Figura 11.

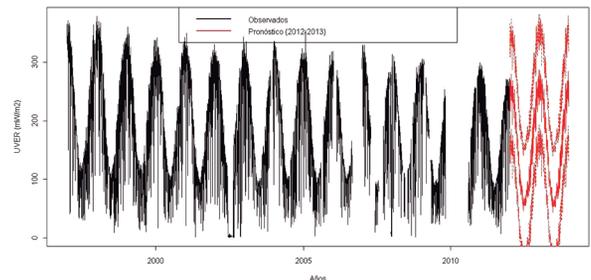


Figura 11. Predicciones diarias de índices UV y sus intervalos de confianza (Julio 2012 a Diciembre 2013).

CONCLUSIONES

El desarrollo de esta investigación se basó fundamentalmente en el análisis de series de tiempo, para describir el comportamiento de series temporales de valores máximos diarios de irradiancia eritémica, a través del método de descomposición clásica.

La serie diaria de valores máximos de irradiancia eritémica presenta comportamiento estacional, con una leve tendencia decreciente. Los valores más altos de UVER ($293,16 - 378 mW/m^2$) se registran en los meses de verano (Diciembre, Enero, Febrero), mientras que en los meses de invierno (Junio, Julio, Agosto) se llegan a los valores más bajos ($1,37 - 30,43 mW/m^2$).

Se utilizó el método de descomposición clásica,

representándose la serie diaria mediante un modelo aditivo, en el cual fueron consideradas las componentes: tendencia, estacionalidad y una componente aleatoria o irregular.

Se realizó la extracción de la tendencia, utilizando el método de mínimos cuadrados; en tanto que para extraer la componente estacional se utilizó un filtro de medias móviles de orden 365. La componente aleatoria se convirtió en una serie estacionaria, que fue ajustada mediante un modelo ARMA (p, q).

El modelo obtenido para la estimación de los valores máximos diarios de irradiancia eritémica fue el siguiente:

$$X_t = 196,08 - 0,006t + 0,938Y_{t-1} - 0,133Y_{t-2} + 0,031Y_{t-7} + 0,045Y_{t-14} + 0,019Y_{t-19} - 0,046Y_{t-25} + 0,033Y_{t-26} + 0,022Y_{t-32} + Z_t - 0,697Z_{t-1} + S_{tj}$$

La serie diaria ha presentado una leve tendencia significativa, que probablemente se estabilizaría con el tiempo. Esto podría deberse a la aparición de algunos fenómenos cíclicos, como por ejemplo “El niño”, que trae consigo una importante cantidad de días lluviosos e inundaciones, lo que ocasionan numerosos días con bastante nubosidad o totalmente cubiertos, por lo que la radiación podría verse bastante atenuada.

Debido a la incerteza del fenómeno, fueron obtenidas algunas predicciones diarias con error estándar elevado y por tanto, unos intervalos de confianza muy grandes. Aun así, los valores de dichas predicciones son bastante razonables.

Mediante la obtención de predicciones para valores máximos diarios de irradiancia eritémica fue posible estimar los índices UV para el departamento Central del Paraguay, teniendo en cuenta lo establecido por la OMS (2003). Las estimaciones del índice UV, que se alcanza en las horas centrales del día, oscila entre valores máximos de 8-11 durante los meses estivales y valores de 2-5 en los meses de invierno. Cabe destacar que, durante la mayor

parte del año se registran índices considerados como “ALTOS” según los estándares internacionales; llegando incluso a alcanzar las valoraciones “MUY ALTO” y “EXTREMADAMENTE ALTO” durante los días correspondientes a los meses de verano.

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Dr. Pere Puig Casado, de la Universidad Autónoma de Barcelona, al Prof. Lic. Constantino N. Guefos Kapsalis, MAE, Decano de la FACEN – UNA, a los directivos y funcionarios del Laboratorio de Investigación de la Atmosfera y Problemas Ambientales (LIAPA) de la FACEN – UNA, al Prof. Dr. Alfonso Pino Graell, Director del Laboratorio de Física de la Atmósfera de la Universidad de Panamá, al Prof. MSc. Genaro Coronel, y a la Prof. Lic. Juana Hernández, Directora del Departamento de Matemática, de la FACEN - UNA, por toda la colaboración y el apoyo brindado.

LITERATURA CITADA

- Aguirre J.A. (1994). Introducción al tratamiento de Series Temporales. Aplicación a las Ciencias de la Salud. Editorial Díaz de Santos. España.
- Akaike, H.A. (1974). New look at statistical model identification. Institute of Statistical Mathematics, Minato-Ku, Tokyo, Japan. pp.716-723.
- Bojkov, R.D. & Fioletov, V.E. (1995). Estimating the global ozone characteristics during the last 30 years. En: Journal Geophysical Research, vol.100, pp.16, 537-16,551.
- Box, G.E.P. & Jenkins, G.M. (1976). Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden-Day.
- Brockwell, P.J. & Davis, R.A. (1996). Introduction to Time Series and Forecasting. Ed. Springer.
- Chatfield, C. (2003). The Analysis of Time Series: An Introduction. Ed. Chapman and Hall. Londres, Inglaterra.
- Cryer, J. & Chang, K. (2008). Time Series Analysis with applications in R. Ed. Springer.
- Diffey, B.L. (1991). Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. En: Phys. Med.

- Biol., vol.36, pp.299-328.
- Fioletov, V.E., Bodeker, G.E., Miller, A.J., Mc Peters, R.D. & Stolarski, R. (2002). Global and zonal total ozone variations estimated from ground-based and satellite measurements: 1964-2000. En: *Journal of Geophysical Research*, vol. 107, doi: 10.1029/2001JD001350.
- Gonzalez C., M. (2009). *Análisis de Series Temporales: Modelos ARIMA*. Universidad del País Vasco.
- Jagger, J. (1985). *Solar UV actions on living cells*. Editorial Praeger, New York.
- Kirchgaessner, G. & Wolters, J. (2007). *Introduction to Modern Time Series Analysis*. Ed. Springer.
- Ljung, G. & Box, G. (1979). On a Measure of Lack of Fit in Time Series Models. En: *Biometrika*, vol.66, pp.265-270.
- Madronich, S. & Flocke, S. (1997). Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the earth's surface. *Solar Ultraviolet Radiation*. En: *NATO ASI Series*, pp.23-48. Springer. Berlin, Alemania.
- Marin, M.J., Martinez-Lozano, J.A., Tena, F. & Utrillas, M.P. (2003). Evolución del Índice UV en Valencia para el año 2002. Comparación de valores reales y simulados. En: *Óptica Pura y Aplicada*, vol.36, pp.39-44.
- Mc Kinlay, A.F. & Diffey, B.L. (1987). A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. En: *CIE Journal*, vol.6, num.1, pp.17-22.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2003). *Índice UV solar mundial: Guía práctica*. Organización Mundial de la Salud. p.29.
- Peña Sanchez De Rivera, D. & Arnaiz Tovar, G. (1981). Criterios de selección de modelos ARIMA. En: *Trabajos de Estadística y de Investigación Operativa*, vol.32, num.1, pp.70-93.
- Peña, D. (1989). Sobre la interpretación de modelos ARIMA univariantes. En: *Trabajos de Estadística*, vol.4, num.2, pp.19-45.
- Peña, D. (2005). *Análisis de Series Temporales*. Alianza Editorial, Madrid. España.
- Puig, P. (2010). *Notas de clase Análisis de Series Temporales*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Pukkila, T., Koreisha, S. & Kallinen, A. (1990). The identification of ARMA models. En: *Biometrika*, vol.77, pp.537-548.
- R Development Core Team. (2010). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL <http://www.Rproject.org>.
- Rivas, M.; Leiva, C. & Rojas, E. (2011). Estudios de series temporales de energía solar UV-B de 305 nm y espesor de la capa de ozono estratosférico en Arica norte de Chile. En: *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol.19, num.2, pp.168-173.
- Uriel, E. (1985). *Análisis de Series Temporales - Modelos ARIMA*. Colección Abaco. Editorial Paraninfo.
- Villavicencio, J. (2005). *Introducción a Series de Tiempo*. Instituto de Estadísticas de Puerto Rico.
- WHO (Organización Mundial de la Salud). (2002). *World Health Organization. Global Solar UV Index: A Practical Guide*. Disponible en: http://www.who.int/pehuv/Solar_UV_Index_Guide_Final.pdf.

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO INDEPENDENCIA EN EL ÁREA NORESTE DE LA CIUDAD DE CAAZAPÁ, PARAGUAY, BASADO EN DATOS DE SONDEOS DE EXPLORACION MINERAL

HYDROGEOLOGICAL EVALUATION OF THE INDEPENDENCIA AQUIFER IN THE NORTHEASTERN AREA OF THE CAAZAPÁ CITY, PARAGUAY, BASED ON DATA FROM MINERAL EXPLORATION

NARCISO CUBAS VILLALBA¹ & DIEGO ADÁN LÓPEZ²

¹Docente Investigador con Dedicación Completa (DIDCOM). FACEN-UNA. E-mail: cubasnp@yahoo.com

²Asistente de Investigación, Dpto. de Geología. FACEN-UNA

Resumen: En el presente trabajo de investigación contiene los resultados de la evaluación hidrogeológica del Acuífero Independencia que ocurre en la zona Noreste de la ciudad de Caazapá, en base a datos de trabajos realizados por compañías de exploración mineral y de sondeos para captación de agua subterránea por empresas de servicio de agua potable.

La ciudad de Caazapá tiene serios problemas de abastecimiento de agua potable, debido a que los pozos que abastecen a la población cubren solamente el 80 % de la demanda de agua potable.

Si bien existen cursos aguas superficiales al Sur de la ciudad como posible fuente para el abastecimiento, pero resulta económicamente inviable dado que dicho curso de agua se encuentra a una distancia de seis kilómetros de la ciudad; además de esto, la utilización de aguas superficiales requieren de costosos procesos de tratamiento para el consumo final.

Los trabajos realizados recientemente por compañía de exploración mineral y de empresas de servicio de agua potable, contribuyeron significativamente para la evaluación hidrogeológica y al mayor conocimiento de las características estratigráficas y litológicas del acuífero Independencia de la porción Noreste de Caazapá.

Los resultados obtenidos confirman la presencia de espesas capas arenosas con buenas condiciones de porosidad y permeabilidad. Además, los ensayos de bombeo y análisis químico del agua subterránea en algunos pozos perforados indican que la zona posee suficiente cantidad y calidad de agua para satisfacer la demanda de agua potable a la ciudad de Caazapá.

Palabras clave: *Acuífero, Permocarbonífero, Prospecto Caazapá, sill de diabasa, Formación San Miguel.*

Abstract: This study contains the results of a hydrogeological evaluation of the Independencia aquifer, found in the northeastern region of the city of Caazapá, Paraguay. This study is based on data from mineral exploration companies and from geophysical logs of water wells made available by water service companies.

The city of Caazapá has serious problems providing drinking water to its inhabitants because the production of the city's water wells meets only 80% of the demand.

Surface water can be found to the south of the city, but economic factors prohibit this from being a viable solution to the city's water needs. Surface water would need to be transported six kilometers to the city; furthermore, surface water requires costly treatment before it is suitable for drinking.

Recent work done by a mineral exploration company and by water service companies has contributed significantly towards the hydrogeological evaluation and the better understanding of the stratigraphic and lithological characteristics of the Independencia aquifer in northeastern Caazapá.

The results obtained confirm the presence of thick beds of sandstone with good porosity and permeability. Furthermore, measurements of water production and chemical analysis of groundwater in selected wells indicate that the aquifer has both the quantity and quality of water necessary to satisfy the demand of the city of Caazapá.

Keywords: *Aquifer, Permocarboniferous, Caazapá prospect, diabase sill, San Miguel Formation.*

INTRODUCCION

La Ciudad de Caazapá está ubicada en la zona Centro-Sur de la Región Oriental de nuestro país, a 224 kilómetros de Asunción; la vía de acceso principal es ruta N° 8 Dr. Blas Garay, que empalma con la ruta N° 2 Mariscal Estigarribia desde el cruce en la ciudad de Coronel Oviedo, pasando por Villarrica. Las coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) que delimitan el área de estudio son las siguientes: Norte: 7106000 – 7116000 m y Este: 563000 – 571000 m.

La zona de estudio (Figs 1), está situado en la porción occidental del Cuenca del Paraná que se caracteriza por la presencia de rocas sedimentaria de edad Carbonífero y Pérmico (Harrington 1950, Putzer 1962), con similitud litológica y estratigráfica al otro lado de la cuenca en la porción Brasilera.

La secuencia, en Paraguay Oriental fue denominada informalmente por TAC (1979) como Permocarbonífero y fue dividida por el mismo trabajo en dos secciones; la primera sección basal de la secuencia es reconocida por TAC (1979), como Permocarbonífero Inferior (LPC) que más tarde el Proyecto Par 83/005 (1986) denominó como Formación Coronel Oviedo de edad Carbo-

nífero Superior. La segunda unidad sobrepuesta a la anterior fue denominada en principio como Permocarbonífero Superior (UPC) por (TAC, 1979), diferenciado a su vez en cuatro unidades: San Miguel, Tacuary, Tapytã y Cabacué, aflorante principalmente al Este de la ciudad de Caazapá. El Proyecto Par 83/005 (1986) le asignó el nombre de Grupo Independencia, reduciendo a su vez la cantidad de unidades a dos formaciones; San Miguel y Tacuary. Según la interpretación de Par 86/005 (1986) las dos unidades superiores Tapytã y Cabacué (TAC, 1979), corresponden a la base de los sedimentos eólicos de Formación Misiones de edad Mesozoica. La división en cuatro formaciones del Permocarbonífero Superior (UPC) fueron sustentados en interpretaciones de los ambientes y/o fácies deposicionales observados en muestras de testigo de pozos perforados por The Anschutz Corp (TAC) entre los años 1979-1983 y en un mapeo preliminar. En el área, ocurren además unidades aloformacionales pertenecientes al Cuaternario que están conformadas por suelos lateríticos y sedimentos recientes. Los sedimentos Carboníferos y Pérmico fueron intruídos por *sills* y diques de diabasa de edad Mesozoica, correspondiente a la Formación

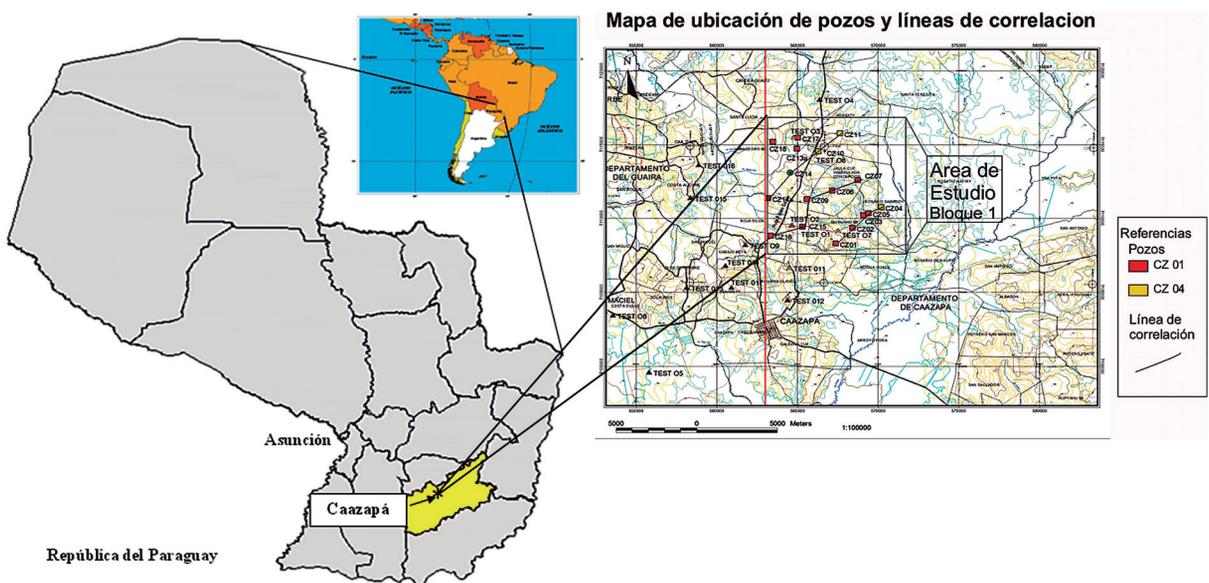


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio y de pozos de exploración perforados.

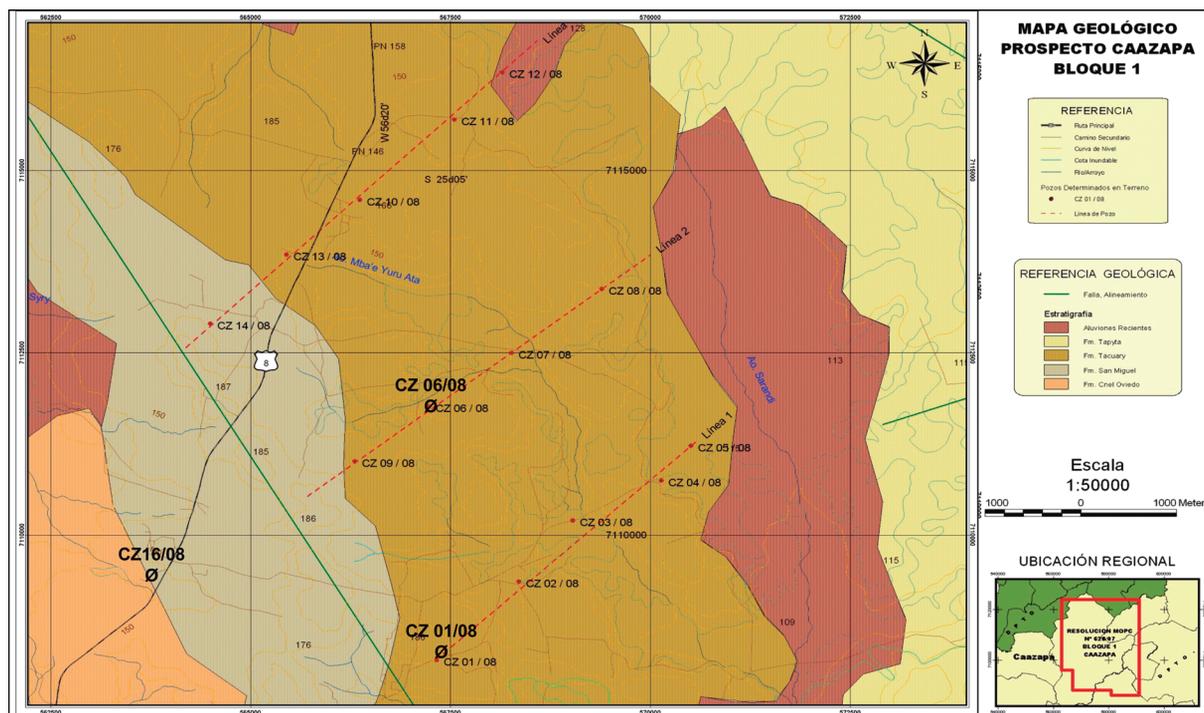


Figura 2. Mapa Geológico del sector NE de Caazapá, modificado de TAC (1982) con ubicación de pozos de exploración mineral perforados en el año 2008 por Wildhorse Energy S.A.

Alto Paraná (Proyecto Par 86/003 1986). En general los estratos poseen dirección NW-SE buzando de 3° a 5° hacia ENE.

Geología Local (Fig. 2)

La unidad Permocarbonífero Superior (UPC) (TAC, 1979) o Grupo Independencia (Par 86/005 (1986) reúnen un conjunto de rocas sedimentarias asignadas al Pérmico Superior (Horrington, 1950), compuesto por espesas secciones de sedimentos continentales, lacustres y marino somero. Está constituido por cuatro formaciones: San Miguel, Tacuary, Tapyta y Cabacua (TAC, 1979) y afloran principalmente al Este de la ciudad de Caazapá.

El Permocarbonífero Inferior (LPC), equivalente a la Formación Coronel Oviedo, se compone litológicamente de diamictitas, areniscas y varvitas depositadas en ambiente marino y continental, con marcada influencia de clima glacial durante la sedimentación. Escasos afloramientos de litología correspondiente a esta unidad pueden ser observados al costado de la ruta N° 8 en el tramo que unen

las ciudades de Caazapá, Maciel, Moisés Bertoni y Fulgencio Yegros hacia al Oeste y Suroeste de Caazapá.

La cobertura superficial en el área, dependen de la topografía; las áreas con relieve más elevado o zonas altas predominan suelos profundos laterítico arenoso-arcilloso generalmente de color marrón rojizo oscuro; el espesor de este tipo de suelo varía entre 10 a 30 metros. En las zonas bajas predominan suelos arcillosos-limosos de color gris claro a oscuro, generalmente orgánico, con espesores entre 2 y 10 m.

Hidrogeología Local

De acuerdo al Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en Paraguay (SAGPY), el acuífero Guaraní en Paraguay se extiende de Norte a Sur, a lo largo de todo el territorio de la Región Oriental del Paraguay. El límite occidental está representado por los sedimentos Permocarboníferos denominados Grupo Independencia y Formación Coronel Oviedo res-

pectivamente que son clasificados como acuíferos semiconfinados (Par 83/006, 1986).

El Acuífero Independencia es un acuífero granular de extensión limitada y bastante heterogénea. Se estima que esta unidad posee un espesor máximo de unos 700 m. Presentan elevada anisotropía y ocurren en forma libre a semiconfinada en la zona aflorante, hacia el Oeste. Aparecen como semiconfinados a confinados por los sedimentos de la Formación Misiones hacia el Este de la Región Oriental.

Debido a su composición litológica con predominancia limo-arcillosa, el acuífero Independencia tiene una permeabilidad muy baja y como consecuencia un potencial regional poco significativo, aunque sus aguas son de buena calidad química (SAG 2005).

El Acuífero Coronel Oviedo es un acuífero granular, constituido por depósitos de origen glacial marino y continental. El espesor promedio de esta unidad es de unos 670 m; aunque en la zona de estudio aparece en forma muy reducida hacia el Oeste. Contiene normalmente agua subterránea de buena calidad, pero suele presentar a veces agua con mayor mineralización.

MÉTODOS

La metodología empleada durante el trabajo de investigación comprendió tres fases de trabajo:

Trabajo de Gabinete

Consistente en recopilación de todas las informaciones relevante existente o disponible del área; estas informaciones se encuentran en los archivos del Viceministerio de Minas y Energía, dependiente del MOPC, Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental (SENASA), Municipalidad de Caazapá y empresas privadas de Servicio de agua potable. En base a la información disponible se han realizado reprocesamiento y reinterpretación de la información histórica, especialmente del área NE de Caazapá; los tipos de datos son registros litológicos, informes, testigos y otro tipo de muestras de perforación disponibles, con el objeto de identificar áreas y nivel con ocurrencia de la Formación San Miguel y así evaluar las características litológicas

y potencial como acuífero.

Los resultados obtenidos en la fase anterior sirvieron de modelo geológico e hidrogeológico para la planificación de investigaciones más detalladas en la siguiente fase de trabajo; estos datos permitieron seleccionar las áreas más favorables desde el punto de vista estratigráfico y estructural para la campaña de perforación de pozos estratigráficos.

Trabajo de campo

Después de completarse la primera fase se dieron inicio a los trabajos de perforación de pozos en el área seleccionada. Dentro del programa de trabajo de campo de la empresa se perforaron un total de 18 pozos de exploración mineral en el área NE de Caazapá, distribuidos en tres líneas de dirección NE –SW (Fig.2). En la primera línea L-1 se perforaron cinco pozos localizados entre las compañías Ñu Pyahu-mí y Rosario Sarandy; el pozo CZ 01 fue seleccionado para la evaluación hidrogeológica.

La segunda línea L-2, abarca la parte central del Prospecto Caazapá y sobre esta fueron perforados tres pozos de los cuales fue estudiado el pozo CZ 06.

La tercera línea de pozos se denomina L-3 su trazado abarca la porción NW del Prospecto Caazapá; de los cinco pozos perforados el pozo CZ 16 quedó como pozo de evaluación hidrogeológica. La profundidad promedio de cada pozo fueron estimados inicialmente entre 150 m para los pozos ubicados hacia la zona oeste, 200 m en la porción central y 250 para el límite Este donde las profundidades han variado de acuerdo a la inclinación de los estratos hacia el centro de la cuenca y hasta alcanzar el basamento de edad Carbonífero.

Los registros litológicos de pozos fueron complementados con perfilaje geofísico realizados con sondas *Century*, provisto de electrodos para lecturas de gamma natural (cps y API), Potencial Espontáneo (SP), Resistividad normal 16” y 64” (ohmm/m). La lectura de los registros fue realizado en los pozos previo al entubamiento y en condiciones llenado con fluidos de perforación.

Durante la construcción de cada pozo se realizaron muestreo continuo de "cutting" muestreados a intervalos de un metro; el registro litológico de

los “cutting” fueron analizados y clasificados con ayuda de lupa binocular y cartilla geotécnica. Una vez que la perforación alcanzó la profundidad final programada, se procedieron a los perfilajes geofísicos y después la entubación, colocación de filtros de gravas y cementación hasta el techo de roca.

Una vez completado el pozo se realizaron las pruebas de bombeo para medir el caudal de agua, nivel estático, nivel dinámico y el abatimiento; el test de bombeo se realizó a caudal constante, y se determinó además la recuperación de nivel del agua.

Análisis de laboratorio

Durante el test de bombeo se procedió al muestreo de agua del pozo, que posteriormente fue enviado al Laboratorio de Calidad de Agua de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción, para su correspondiente análisis físico-químicos y bacteriológicos.

Ensayos de bombeo

Se realizaron test de bombeo en tres pozos CZ 01, CZ 06 y CZ 16 (Tabla 1), de los 18 pozos perforados por la empresa Widhorse Energy S.A., en el área

NE de Caazapá.

El objetivo de la empresa fue determinar la calidad y cantidad de agua en la Formación San Miguel, a fin de entregar a las comunidades asentadas en el área, como una contribución social de la empresa Wilhorse Energy S.A., a satisfacer sus necesidades de agua potable.

Los test de bombeo, fueron realizados a caudal constante, con una duración de 24 horas como mínimo. Si bien existen varios métodos de interpretación del test de bombeo, solo se ha utilizado el método de Theis, debido a la limitación para la realización de ensayos de larga duración y la no disponibilidad de pozos de observación indispensable para el cálculo del coeficiente de almacenamiento (S). Por otro lado, tampoco fue posible aplicar el método de Cooper-Jacob debido a la corta duración de los test de bombeo.

Interpretaciones de la curva de descenso versus tiempo de bombeo muestran que el acuífero San Miguel, corresponde al tipo confinado. En dos pozos CZ 06 y CZ 16, el test de bombeo al alcanzado el régimen de equilibrio; en el pozo CZ 01, tal condición no se ha alcanzado.

Tabla 1. Resumen de los parámetros hidráulicos obtenidos en los ensayos de bombeo de los tres pozos del área NE de Caazapá.

Pozo	Lugar	Parámetros hidráulicos						Recuperación	
		Nivel Estático	Nivel Dinámico	Caudal promedio m ³ /h	Duración min.	Transmisiv. m ² /día	Caudal especific. lcom ³ /h/m	Duración en min.	Recuperac. %
CZ 01	Sta. María	21.5	24.27	6.68	1440	41.3	2.41	900	90.00
CZ 06	Ñu Pyahu mi	0.00	17.30	9.08	1440	7.88	0.525	20.0	97.68
CZ 16	Rojas Silva	14.5	42.60	5.41	1440	5.86	0.193	390	90.30

En general los valores de Transmisividad de la Formación San Miguel en el área NE de Caazapá son bajos, varían desde 6 a 42 m²/día. Los pozos ubicados hacia el sector SE del Prospecto Caazapá, presentan mayores valores de Transmisividad, con una disminución hacia el NW. Los bajos valores se deben principalmente a los intervalos tomados para el cálculo de la misma, correspondiendo a zonas con mayor pérdida de carga.

Sin embargo, los test realizado han permitido conocer el potencial hidrogeológico de la Formación San Miguel en el área NE de la ciudad de Caazapá, así como su comportamiento como acuífero confinado.

Análisis químico de agua subterránea

En el laboratorio de Calidad de Agua fueron realizados los análisis fisico-químico y bacteriológico de las muestras de aguas subterráneas de los tres pozos del sector NE de Caazapá por Wildhorse Energy S.A. Los resultados se muestran en las Tablas 1-4 y las figuras 3-5.

RESULTADOS

Los resultados de los análisis fisico-químicos y bacteriológicos muestran que las aguas subterráneas de la Formación San Miguel, presentan variaciones de tipos de aguas de acuerdo a la ubicación en zona, que se deben probablemente al flujo regional preferencial del agua subterránea desde el NW hacia el SE.

Considerando los valores de Sólidos Totales Disueltos (STD) existen variaciones, con valores bajos, 41 mg/l hacia el sector Oeste como el caso de la muestra de agua del pozo CZ 16; este valor de STD, es muy similar al agua de lluvia. Hacia el E y SE presentan mayor mineralización con valores alto a intermedio entre 186 mg/l en el pozo CZ 06 y 108 mg/l en el pozo CZ 01. Este aumento en el contenido de los Sólidos totales disueltos, evidencian mineralización del agua de la Formación San Miguel hacia el E y SE, debido a proceso de mezcla con agua fósil o por la influencia de las intrusiones basálticas que tuvo su mayor efecto hacia el Este y SE.

Tabla 2. Resultados de análisis químico de agua del pozo CZ 01.

Iones	mg/l	Otros	mg/l
Ca ⁺⁺	4,49	Fe total	0,025
Na ⁺	3,07	Br	0,0
K ⁺	7,07	Mn	<0,005
Mg ⁺⁺	2,98	Cr	<0,001
HCO ₃ ⁻	4,94	O ₂ Cons	0,50
SO ₄ ⁻	3,36	STD	108
CL ⁻	3,02	Alcalin.	21,5
Suma	28,93	Dureza	23,46

En cuanto a la alcalinidad se observan valores dispares, los pozos CZ 01 y CZ 16, contiene baja alcalinidad entre 35 mg/l y 21,5 mg/l respectivamente. En cambio el valor más alto es en el pozo CZ 06 con 186,6 mg/l.

Los tipos de iones presente en el agua subterránea también presentan variaciones de valores con respecto a la ubicación del área; hacia el sector NW del área, donde fue perforado el pozo CZ 16 contiene agua del tipo bicarbonatada Ca-Mg. En cambio, las aguas subterráneas de los pozos ubicados hacia

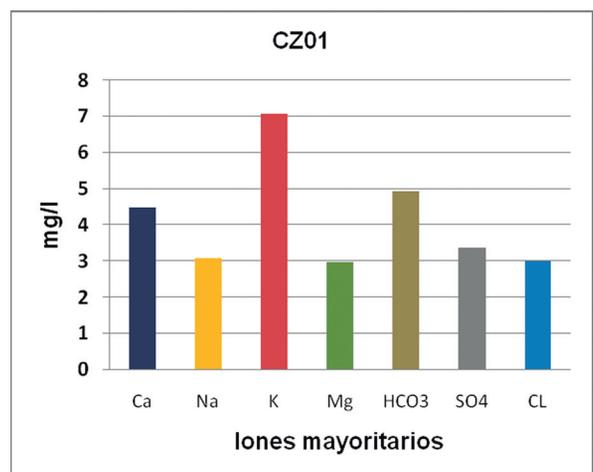


Figura 3. Representación gráfica en barras de las concentraciones en mg/l de iones mayoritarios presente en el agua subterránea pozo CZ01.

Tabla 3. Resultados de análisis químico de agua del pozo CZ 06.

Iones	mg/l	Otros	mg/l
Ca ⁺⁺	34,0	Fe total	0,045
Na ⁺	33,6	Br	0,0
K ⁺	1,65	Mn	<0,005
Mg ⁺⁺	11,19	Cr	<0,001
HCO ₃ ⁻	179,14	O ₂ Cons	0,00
SO ₄ ⁻	3,93	STD	186
CL ⁻	3,06	Alcalin.	186,61
Suma	266,57	Dureza	131,0

el sector SE corresponden a aguas del tipo bicarbonatada Ca-Na, como el caso del pozo CZ 06 y en el pozo CZ 01 el agua subterránea responde a una mezcla de los tipos de bicarbonatada Ca-Mg con sulfatada-clorurada K-Na.

Los valores de pH medidos en laboratorio varían desde 5,8 (CZ01), 7,7 (CZ16) y 8,7 (CZ06). Valores normales del pH en agua subterránea es entre 5,5 – 8,5; dentro de este rango están los pozos CZ 01 y CZ16. El pH del agua en el pozo CZ 06, se encuentra fuera del límite del rango aceptable correspondiendo a agua fuertemente alcalina. Químicamente las aguas subterráneas de la Formación San Miguel bicarbonatadas cálcicas, con baja

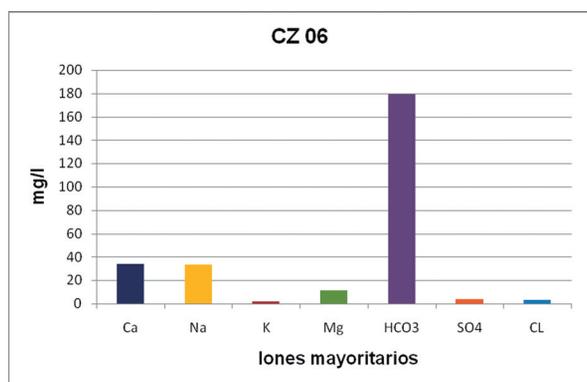
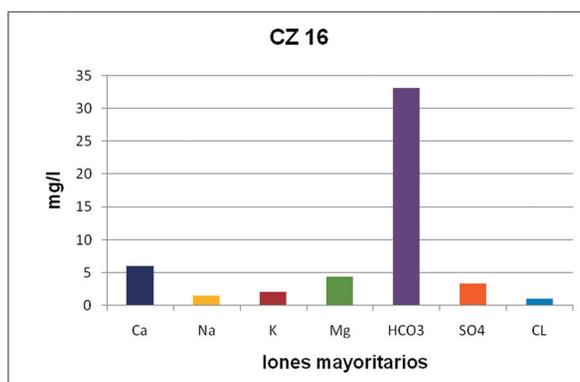
Tabla 4. Resultados de análisis químico de agua del pozo CZ 16.

Iones	mg/l	Otros	mg/l
Ca ⁺⁺	6,0	Fe total	0,190
Na ⁺	1,54	Br	0,0
K ⁺	2,09	Mn	<0,005
Mg ⁺⁺	4,38	Cr	<0,001
HCO ₃ ⁻	33,12	O ₂ Cons	0,16
SO ₄ ⁻	3,36	STD	41
CL ⁻	1,02	Alcalin.	35,05
Suma	51,51	Dureza	33,0

mineralización, con valores ligeramente alto de Fe total y Fósforo total.

Según los análisis físico-químico del agua, en general a excepción del contenido de hierro, el agua cumple con todos los parámetros establecidos en la Norma vigente NP 24 001 80 del Instituto de Tecnología y Normalización (INTN), con excepción del hierro y fósforo que requeriría un tratamiento adecuado para el control.

El pozo CZ 16, se ha encontrado contaminación de Coliforme totales con 200 UCF/100ml y Coliforme fecales 35UFC/100ml. Aparentemente la contaminación se debió al inadecuada manipulación durante la toma de muestra de agua de este pozo, ya

**Figura 4.** Representación gráfica en barras de las concentraciones en mg/l de iones mayoritarios presente en el agua subterránea pozo CZ06.**Figura 5.** Representación gráfica en barras de las concentraciones en mg/l de iones mayoritarios presente en el agua subterránea pozo CZ16.

que en la zona cercana al pozo no existen fuentes potenciales de contaminación.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el área de estudio fueron identificados dos unidades sedimentarias de edad Carbonífero y Pérmico. La primera unidad aflora principalmente hacia el W de Caazapá y forma una faja de dirección N-S. En el sector NE de Caazapá, predominan rocas sedimentarias del Grupo Independencia, atribuida al Pérmico Superior formando también una faja de ocurrencia de dirección N-S, paralela a la Formación Coronel Oviedo; el contacto entre estas dos unidades es por falla de dirección NW-SE.

El grupo Independencia en el área de estudio está constituido por tres formaciones: San Miguel, Tacuary y Tapyta (TAC, 1979). La formación San Miguel constituye la base del Grupo Independencia y en el área de estudio posee espesor promedio de 50 m; siendo constituida por areniscas de grano medio a fino de color rosado a gris, matriz arcillosa, friable a moderadamente cementada por hematita y carbonato.

Por debajo de esta unidad se encuentran rocas sedimentarias de grano fino a muy fino constituido por arcillitas laminada de color marrón oscuro a negro generalmente orgánico a veces con intercalaciones de siltita gris verdosa y areniscas gris calcáreas de espesor variable, correspondiente a la Formación Coronel Oviedo de edad Carbonífero; el contacto entre ambas unidades es de carácter erosivo.

Por encima de la Formación San Miguel, se encuentra la Formación Tacuary; se trata una secuencia progradacional de depósitos sedimentarios de ambientes deltaicos transicionales y marinos somero compuesto por areniscas, siltitas, arcillitas; en parte las areniscas están cementadas por carbonato. Ocurren intercalada niveles de oolitas silíceas atribuibles a depósitos marino somero con aguas agitadas.

La tercera unidad del Grupo Independencia es la Formación Tapytã; esta unidad se encuentra por encima de la Formación Tacuary, en contacto transicional y ocurre principalmente en los pozos

ubicados más al Este del área de estudio. Está compuesto por areniscas de grano medio a grueso con escasa matriz, con raras intercalaciones de arcillitas o siltitas masivas a laminadas. Su espesor varía también desde unos 20 m hacia el Oeste hasta 120 m hacia el Este. En general los estratos poseen dirección NW-SE con leve buzamiento de 3 a 5° hacia ENE.

Las unidades Carbonífero y Pérmico fueron intruídas por varios sill de diabasa de la Formación Alto Paraná de edad Mesozoica; las capas de diabasa se disponen en forma paralela a subparalela entre los estratos afectando preferentemente la zona de contacto de distintas unidades y actúan a su vez como capa confinante de los acuíferos inferiores.

El potencial hidrogeológico del área NE de Caazapá, es mayor comparado con el acuífero Coronel Oviedo, el cual actualmente abastece de agua potable a la ciudad de Caazapá. Se ha comprobado que la Formación San Miguel es un acuífero regional de espesor promedio de 45 m y contiene agua dulce de baja mineralización.

Los ensayos de bombeo fueron insuficientes para evaluar las características hidrogeológicas reales del acuífero debido a la corta duración de los ensayos, bajo caudal de bombeo y la ausencia de pozos de observación.

No obstante los pozos ensayados indican que pueden producir cada uno entre 50 y 90 m³ de agua por día considerando 10 horas de bombeo, con descenso mínimo y la recuperación del 90%. La Transmisividad y el Caudal Específico resultaron con valores bajo debido a que fueron calculados en tramos del ensayo donde se observa alta pérdida de carga.

Los resultados de los análisis químicos indican que las aguas subterráneas de la Formación San Miguel, presentan variaciones de tipos de aguas de acuerdo a la ubicación en zona; estas variaciones se deben probablemente al flujo regional preferencial del agua subterránea desde el NW donde el tipo de agua es bicarbonatada Ca-Mg, con mayor mineralización y probable intercambio cationes entre Mg y Na hacia el E donde se ha encontrado agua del tipo bicarbonatada Na-Ca en el pozo CZ 06; en el

pozo CZ 01 localizado en el extremo SE, presenta mezcla de aguas entre bicarbonatada Ca-Mg y Sulfatada-Clorurada K-Na.

AGRADECIMIENTOS

Al Prof. Darío Gómez, Country Manager de la empresa Widhorse Energy S.A., por proveer parte de los datos de la exploración de Uranio en el área NE de Caazapá.

BIBLIOGRAFIA

The Anschutz Corporation (TAC) 1982. Annual summary of exploration operations in Paraguay, Vol 1. Int. Comp. Report Asunción - Paraguay.

Carlson, L. A., 1981. Progress Report Caazapá. TAC Depart. Corresp. to John Pearson.

Fariña, S. 2007. Uso Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní en la Región Oriental del Paraguay. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní - Región Oriental del Paraguay SEAM - BGR. Vol. 2. Geología e Hidrogeología.

Harrington, H., 1950. Geología del Paraguay Oriental. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Contribuciones Científicas Serie E Geología, 82 pág. Buenos Aires.

Hsu, F. T., 1979. Detailed Exploration. Volume III Caazapá Area: TAC, Internal Report.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). 1998. Guías para la calidad de agua potable. Publicación Científica Nº 8. Vol. 3. 138 pág.

Orue, D. 1996. Síntese da Geologia do Paraguai Oriental, com Ênfase para o Magmatismo Alcalino associado. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências, 163 pág.

Proyecto PAR 83/005. 1986. Mapa Geológico del Paraguay. PNUD – MDN, Mapa Escala 1:1.000.000. Texto Explicativo. 93pág.

Proyecto PAR 83/006. 1986. Mapa Hidrogeológico del Paraguay. PNUD – MDN, Mapa Escala 1:1.000.000. Texto Explicativo. 80pág.

Sistema Acuífero Guaraní (SAG). 2005. Manual de perforación de pozos tubulares para la investigación y captación de agua subterránea. UNEP (United Nations Environment Programme). Proyecto para la protección ambiental y manejo sostenible del acuífero. 94 pág.

SENASA (Servicio Nacional de Saneamiento Ambiental, PY) 1994. Contribución al conocimiento Hidrogeológico del área de Caazapá. Publicación Técnica Nº 1. 34 pág.

Theis, C.V. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans Am. Geoph. Union, pp 519-534.

Trombe, F. 1986. Las aguas subterráneas. Editorial Orbis. España.

Villanueva, M. & Iglesias, A. 1984. Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Ed. ITGE. Barcelona, España. Documento Electrónico. <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro35/lib35.htm>.

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN UNA ZONA DE ACTIVIDAD MINERA DE LA CIUDAD DE ITÁ EN FEBRERO DEL AÑO 2015

STUDY OF THE VARIABILITY OF CONCENTRATION OF PARTICULATE MATTER IN A ZONE OF MINING ACTIVITY IN THE CITY OF ITÁ IN FEBRUARY, 2015

JULISSA ARMOA^{1,2}, F. Méndez G.¹ & T. Rolón C.¹

¹Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. ²Email: julyar717@gmail.com

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados de los estudios realizados con el fin de contribuir a un mayor conocimiento de los niveles de concentración atmosférica de material particulado en zonas de actividad minera en Paraguay, tanto para partículas finas como para partículas gruesas. El procedimiento consistió en realizar un muestreo de la concentración de partículas suspendidas en la atmósfera utilizando el monitor de partículas de la marca Kanomax, modelo 3887, perteneciente al Laboratorio de Investigación de la Atmósfera y Problemas Ambientales (LIAPA), dependiente de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FACEN). La recolección de datos fue realizada en el predio de una industria minera dedicada a la extracción, trituración y procesamiento de piedras del tipo basálticas para la posterior producción de mezcla asfáltica. Una vez recabados los datos, primeramente se calcularon las densidades correspondientes para cada nivel de concentración medido y se procedió a comparar con los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Reglamento Nacional, comprobándose así que los niveles de material particulado fino con diámetro aerodinámico igual a $0.3\mu\text{m}$ y $0.5\mu\text{m}$ se encuentran por debajo de los máximos valores permitidos, constituyendo el 5,5% del máximo Nacional y el 6,6% del máximo de la OMS para el MP de $0.3\mu\text{m}$ y el 25,4% del máximo Nacional y el 30,5% del máximo de la OMS para el MP de $0.5\mu\text{m}$ mientras que para el material particulado grueso, con diámetro aerodinámico igual a $5\mu\text{m}$, se demostró que los límites tanto nacionales como internacionales son ampliamente superados, en 1650% del máximo de la OMS y 483% del máximo Nacional.

Palabras Clave: contaminación, material particulado (MP), calidad del aire, piedras basálticas, mezcla asfáltica, OMS, reglamento nacional.

Abstract: This paper presents the results of studies conducted in order to contribute to a better understanding of the levels of atmospheric concentration of particulate matter in areas of mining activity in Paraguay, both fine particles to coarse particles are present. The procedure consisted of sampling the concentration of suspended particles in the atmosphere using the particle monitor the Kanomax make, model 3887, part of the Research Laboratory for Atmospheric and Environmental Problems (LIAPA) under the Faculty of Science Natural (FACEN).

Data collection was performed at the site of a mining industry for the extraction, crushing and stone processing basaltic type for the subsequent production of asphalt. Once collected the data, first the corresponding densities for each level measured concentrations were calculated and proceeded to compare with the limits set by the World Health Organization (WHO) and National Regulation, proving so the levels of particulate matter fine with aerodynamic diameter equal to $0.3\mu\text{m}$ and $0.5\mu\text{m}$ are below the maximum permissible values, constituting 5.5% of the national peak and 6.6% of the maximum of the WHO MP of $0.3\mu\text{m}$ and 25,4% of the national peak and 30.5% of the maximum of WHO for the $0.5\mu\text{m}$ MP while for coarse particulate matter with an aerodynamic diameter equal to $5\mu\text{m}$, it was shown that both national and international boundaries are far outweighed in 1650% of maximum WHO and 483% of the national peak.

Key words: contamination, particulate matter (PM), air quality, basalt stone, asphalt, OMS, National Regulation.

INTRODUCCIÓN

Cuando algunas sustancias en el aire sobrepasan cierta cantidad o valor de referencia, usualmente expresada en unidades de concentración, éstas producen consecuencias adversas al hombre y al ambiente; por lo que una fuente de contaminación del aire es una actividad que aporta contaminantes a la atmósfera; las fuentes de emisión de origen antrópico suelen dividirse para su estudio en fuentes móviles y fijas, las primeras incluyen todas las formas de transporte y las segundas son las sustancias emitidas en procesos de transformación de materia prima, trituración, generación de vapor, centrales eléctricas entre otras. (Wark, 2005).

Durante los últimos años, el material particulado atmosférico ha suscitado un gran interés debido a su impacto en la salud humana, ecosistemas y cambio climático (De la Rosa, 2008). Puesto que la contaminación atmosférica es un problema que se ha acrecentado en las últimas décadas en todo el planeta, se vuelve imperante una gestión efectiva de la calidad de aire, enfocada en la reducción de la exposición poblacional al mínimo, especialmente al tener en cuenta que incluso a bajas concentraciones de contaminantes del aire la carga sobre la salud puede ser sustancial (Seoánez, 2002).

Teniendo en cuenta que las explotaciones mineras se caracterizan por una importante contribución

al aire de partículas de diferente tamaño y composición derivadas de las actividades extractivas, transporte y tratamiento de mineral, es de suma importancia un análisis adecuado del mismo es así que este emprendimiento busca ser una base de información y fundamento en los planes de acción en las políticas de lucha contra la contaminación atmosférica, de modo que sea posible advertir a la población el riesgo al cual es expuesto.

Los propósitos de la investigación son determinar los niveles de concentración de material particulado fino y grueso en una zona de actividad minera de la ciudad de Itá, para posteriormente comparar los niveles de las densidades de material particulado fino y grueso en la zonas de estudio, con los límites establecidos en las normas de la OMS publicado en la “Guía de calidad del aire del año 2005”

A nivel nacional se encuentra actualmente vigente la Ley 5211/14, promulgada el 4 de julio de 2014, el cual establece en las disposiciones generales: “De quien contamina responde compensando in natura e indemnizando”. Además se cuenta con la resolución N° 259/15 por la cual se establecen los parámetros permisibles de calidad del aire que fueron remitidos por la Dirección General del Aire y aprobado en fecha 3 de julio del año 2015, la misma se encuentra resumida en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros permisibles de calidad de aire de acuerdo a las normas nacionales vigentes.

Contaminantes	Media Anual	Media en 24h	Media en 8 h	Media en 1h
MP2,5	15 ug/m ³	30 ug/m ³	-	-
MP10	-	150 ug/m ³	-	-
O3	-	-	120 ug/m ³	-
NO2	40 ug/m ³	-	-	200 ug/m ³
SO2	-	20 ug/m ³	-	-
CO	-	-	10 ug/m ³	-

MATERIALES Y MÉTODOS

El lugar elegido para llevar a cabo las mediciones de la concentración de material particulado fue el distrito de Arrua`i de la ciudad de Itá del departamento central, para llegar al lugar se toma la Ruta N°1 “Mcal. Francisco Solano López”, en dirección Asunción-Encarnación, hasta llegar la ciudad de Itá. Luego, se recorren unos 5km aproximadamente y se toma el acceso a la derecha conocido como Acceso a Arrua`i (figura 1), unos 6,5km hasta llegar a la zona de medición de la concentración de material particulado (MP).



Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Para la realización del muestreo fue utilizado el monitor de partículas de la marca Kanomax, modelo 3887; el cual es un medidor de la concentración de partículas como polvo, hollín, polen y otros aerosoles que se encuentran en el aire. El medidor muestra tres tamaños de partículas $0,3\mu\text{m}$, $0,5\mu\text{m}$ y $5\mu\text{m}$, al mismo tiempo en pantalla; dispone de una memoria para 8000 valores; es alimentada mediante un acumulador recargable y es válido para realizar mediciones según la norma ISO 14644-1 (Kanomax, 2012).

Fue necesario considerar el horario en el que operan las empresas mineras, el cual es de 6:00am hasta las 6:00pm todos los días de la semana par-

do la producción solo en días feriados; considerando el horario de trabajo se tomo la decisión de realizar el muestreo desde las 9:00am hasta las 5:00pm, abarcando así ocho horas actividad minera, lo cual fue realizado con la finalidad de obtener datos relevantes para la investigación en dicha franja horaria los días 2 y 3 de febrero del año 2015.

El monitor de partículas fue configurado para realizar la toma de datos cada 5min, siendo la muestra de aire aspirada por 30 segundos, luego el medidor deja de operar, arrojando en la pantalla los valores promedios de concentración obtenidos en el tiempo de aspiración para partículas de $0.3\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$ y $5\mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico; al cabo de 5min vuelve a tomar una muestra siguiendo este ciclo de recolección de datos durante las ocho horas de medición ininterrumpida realizada los días 2 y 3 de febrero. El punto de medición fue único ubicado en las siguientes coordenadas: $25^{\circ}35'20,31''$ latitud sur y $57^{\circ}21'17,71''$ longitud oeste (figura 2).

El punto de medición se encontraba ubicado entre la cantera y la planta trituradora, considerado un punto clave ya que en la cantera es extraída la

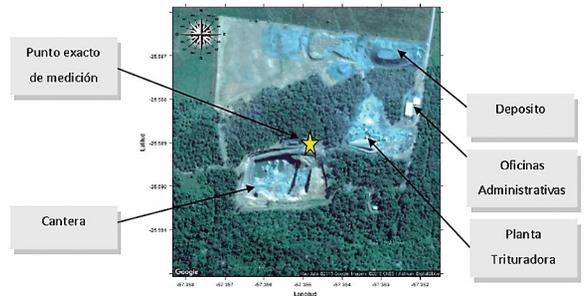


Figura 2. Ubicación del punto de medición.

materia prima y en la planta trituradora es procesada la misma para la obtención del producto.

Asimismo cabe destacar que la ubicación del punto exacto de la realización del muestreo se encuentra ubicado en el interior de una propiedad privada perteneciente a una de las empresas mineras de la región; además en el intervalo de tiempo del muestreo se encontraban operando 5 canteras de extracción y procesamiento de piedras, ubicándose dos de ellas en la dirección noreste y sureste respectivamente con respecto al punto de medición (figura

3), mientras que las otras dos canteras se encuentran alejadas una distancia considerable.

Los datos inicialmente fueron tabulados en planillas Excel, luego se organizaron secuencialmente por hora de medición para cada tamaño de MP

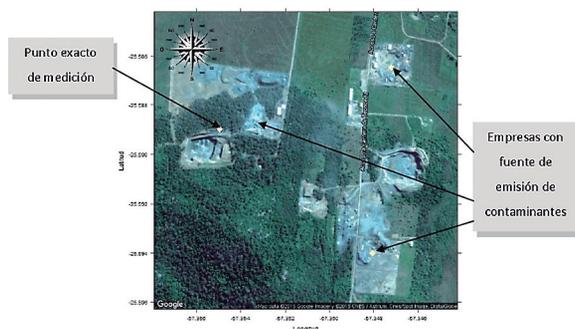


Figura 3. Ubicación de las fuentes de emisión de contaminantes.

medido, posteriormente se procedió a calcular los niveles de densidades de concentración de MP con el fin de estimar comparaciones con respecto a los límites permitidos por las normativas nacionales e internacionales; para lo cual se utilizó la ecuación (1) que permite determinar la densidad en $\frac{\mu g}{m^3}$ a partir de las variables que intervienen en la ecuación (Seinfeld y Pandis, 2006)

$$\rho_{MP} = \kappa \cdot \rho_p \cdot \eta \cdot D_{MP}^3 \quad (1)$$

Donde:

- $\kappa = \frac{\pi}{6.000.000}$ es una constante adimensional que permite obtener la densidad en las unidades de medida requerida,
- ρ_p es la densidad de las partículas emitidas, en el presente trabajo se consideró la densidad del polvo igual a $2,3 \frac{g}{cm^3}$,
- η es la concentración de partículas por unidad de volumen conocido mediante el medidor de partículas.
- D_{MP} es el diámetro aerodinámico del material particulado, en el trabajo se consideraron tres valores igual a $0,3\mu m$, $0,5\mu m$ y $5\mu m$.

El valor considerado de densidad de partículas emitidas a la atmósfera ρ_p es un valor uniforme puesto que se analiza un tipo específico de contaminante atmosférico.

Una vez determinadas las densidades de material particulado de $0,3\mu m$, $0,5\mu m$ y $5\mu m$ se procedió a comparar con los estándares establecidos por la OMS y por la resolución N° 259/15 de la ley 5211/14 establecida en el reglamento nacional, para ello se consideró al material particulado de diámetro aerodinámico igual a $0,3\mu m$ y $0,5\mu m$ en el rango menor a $2,5\mu m$ lo cual representa al material particulado fino y al material particulado de diámetro aerodinámico igual a $5\mu m$ en el rango mayor a $2,5\mu m$ y menor a $10\mu m$ representando el mismo al material particulado grueso; de esta forma fue posible comparar todos los datos recolectados mediante las mediciones con los estándares de calidad del aire conocidos.

RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Mediante una amplia interpretación de los resultados obtenidos en los diferentes muestreos realizados de los valores de concentración fue posible la estimación de las densidades para los diferentes tipos de materiales particulado analizados; permitiendo de esta manera la inferencia de diferentes conclusiones a través de las mismas.

En la figura 4 y 5 se presentan los niveles de concentraciones promedio obtenidos para cada muestra tomada en los dos días de medición, los

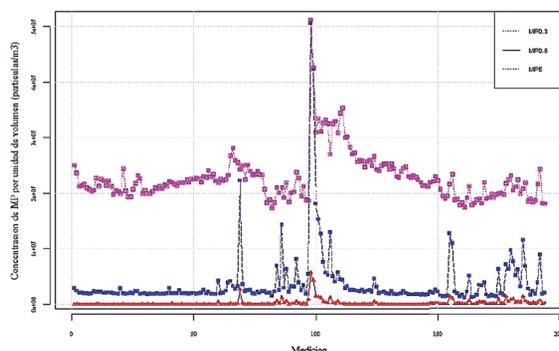


Figura 4. Densidad de diferentes tamaños de partículas medida durante dos días de muestreo.

cuales corresponden al 2 y 3 de febrero de 2015, es importante resaltar que los datos correspondientes al primer día de medición van desde la medición número 1 hasta la medición número 98, iniciando el segundo día en la medición número 99 hasta la 194; esta aclaración es realizada con el fin de facilitar la interpretación de los datos en las graficas correspondientes. Se representa en una misma grafica la concentración de los tres tipos de partículas medidos, con el propósito de visualizar con mayor facilidad los niveles de concentración del MP fino y grueso en el aire ambiente de la región de estudio.

Mediante la figura 4 es posible inferir que en todo momento durante el muestreo existe mayor concentración de partículas finas con diámetro aerodinámico igual $0.3\mu\text{m}$ y $0.5\mu\text{m}$, esto es debido a que las mismas se generan primordialmente por reacciones químicas y de condensación de materias más pequeñas, incluidas moléculas en estado de vapor.

Específicamente en la zona de estudio, las partículas finas son originadas primordialmente por compuestos orgánicos y los gases contaminantes arrojados a la atmosfera por las maquinarias, puesto que los vehículos que transportan las piedras extraídas para ser trituradas y procesadas utilizan combustibles fósiles, además de los detonantes que se manipulan para perforar la superficie terrestre.

Igualmente mediante un análisis estadístico se tiene que los valores mínimos son $1,74 \cdot 10^7 \frac{\text{partículas}}{\text{m}^3}$ y $1,28 \cdot 10^6 \frac{\text{partículas}}{\text{m}^3}$ para material particulado con diámetro aerodinámico igual a $0.3\mu\text{m}$ y $0.5\mu\text{m}$ respectivamente; de forma análoga se tienen los valores máximos los cuales son $5,12 \cdot 10^7 \frac{\text{partículas}}{\text{m}^3}$ y $5,07 \cdot 10^7 \frac{\text{partículas}}{\text{m}^3}$ para material particulado con diámetro aerodinámico igual a $0.3\mu\text{m}$ y $0.5\mu\text{m}$ respectivamente, por otro parte los valores promedio en ambos días de medición son $2,29 \cdot 10^7 \frac{\text{partículas}}{\text{m}^3}$ y $3,75 \cdot 10^6 \frac{\text{partículas}}{\text{m}^3}$ para material particulado con diámetro aerodinámico igual a $0.3\mu\text{m}$ y $0.5\mu\text{m}$ respectivamente.

Debido a que las partículas gruesas con diámetro

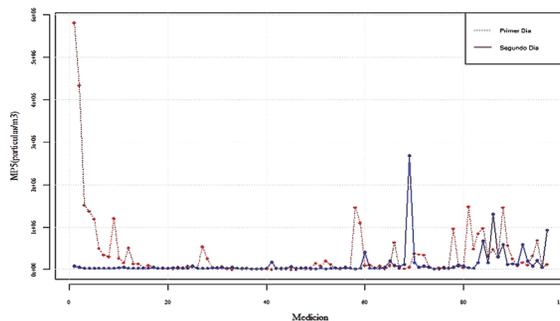


Figura 5. Niveles de concentración del material particulado grueso ($5\mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico) registrado durante los muestreos.

aerodinámico igual a $5\mu\text{m}$ poseen una escala menor a las partículas finas se recurre a la figura 5 para un mejor análisis.

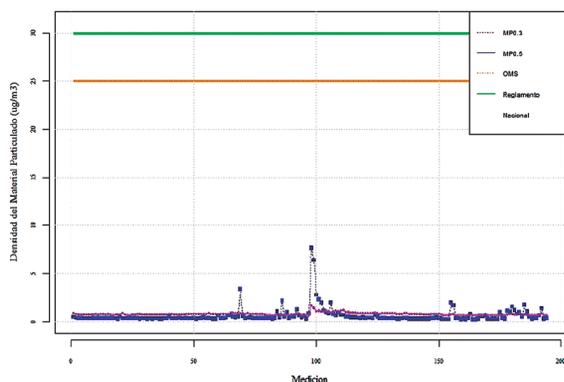
En la figura 5 se presentan los niveles de concentración de partículas gruesas medidos; las cuales se encuentran en menor proporción comparada con las partículas finas debido a que provienen principalmente de la suspensión de polvo, actividades de la minería y de la agricultura. Además se puede ver que el máximo de partículas por unidad de volumen es igual a $5,81 \cdot 10^6/\text{m}^3$ el cual corresponde a una de las primeras mediciones realizadas el día 3 de febrero, un mínimo igual a $6,36 \cdot 10^3 \frac{\text{partículas}}{\text{m}^3}$ y un valor promedio en ambos días igual a $2,44 \cdot 10^5 \frac{\text{partículas}}{\text{m}^3}$; es importante destacar que todos los valores máximos de concentración de MP para los tres tamaños de diámetros aerodinámicos medidos pertenecen al mismo intervalo de tiempo, debido a que ese día se produjo mezcla asfáltica en la industria desde la 7:00am hasta la 9:30am aproximadamente debido a un pedido especial realizado por un ente privado a la industria minera.

Examinando la figura 4 se visualiza que en ambos días las concentraciones son relativamente más bajas por la mañana y aumentan por la tarde, lo cual se produce debido a que las empresas comúnmente por la mañana extraen la materia prima, mientras que por la tarde realizan el procesamiento de la misma; es importante aclarar que por la tarde aparte de procesar sigue la extracción pero en menor proporción, este ciclo está sujeto a la demanda

que existe en el mercado, en particular durante el muestreo se pudo apreciar los picos de variaciones que se puede existir aumentando la actividad minera e industrial.

Con el fin de determinar si los niveles de concentración de material particulado se encuentran entre los estándares de calidad de aire, fue necesario determinar los niveles de densidad de MP en microgramos por metro cúbico para luego compararlo con los límites establecidos por la OMS y el reglamento nacional, así tenemos la figura 6 y 7 en los cuales se analiza a las partículas finas y gruesas respectivamente.

En la figura 6 se puede observar como los valores de densidad de MP fino varía ampliamente para cada medición realizada los días 2 y 3 de febrero, pero a pesar de que existen picos de concentración máxima de dichas partículas por unidad de volumen, las mismas no superan los estándares de calidad del aire para material particulado fino, la



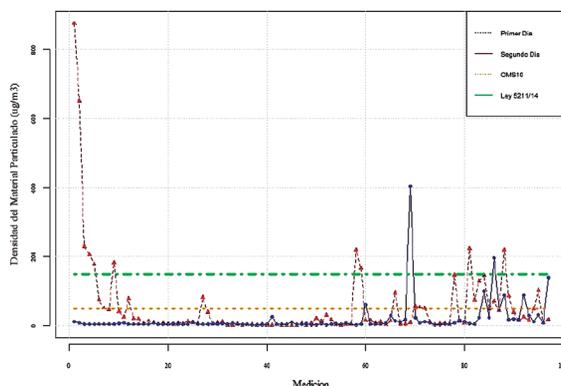
Figuras 6. Densidad del material particulado fino detectado durante los muestreos en relación a los límites estándar establecidos por la OMS y el reglamento nacional.

explicación es sencilla teniendo en cuenta que las mediciones que se realizan son de concentración de MP por unidad de volumen, por supuesto al tener menor diámetro aerodinámico se tendrá mayor concentración de partículas de $0.3\mu\text{m}$ o $0.5\mu\text{m}$ que de $5\mu\text{m}$ en una unidad de volumen. Entonces se tiene que la mayor concentración por volumen medida del material particulado fino no es directamente proporcional a obtener un nivel muy elevado de densidad del mismo.

Por tanto, el $\text{MP}_{2.5}$ no supera los estándares de la calidad del aire de la OMS, ni del reglamento nacional, puesto que los valores máximos alcanzados son iguales a $1.66 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ para el material particulado de $0.3\mu\text{m}$ el cual se encuentra aproximadamente un 93% debajo del límite establecido por la OMS y 94% debajo del límite establecido por el reglamento nacional, es decir constituye el 5,5 % del máximo Nacional y el 6,6 % del máximo de la OMS.

Por otra parte, él determina un máximo de $7,63 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ para el material particulado de $0.5\mu\text{m}$ que a su vez se sitúa aproximadamente en un 69% por debajo del valor fijado para material particulado fino por la OMS y 74% por debajo de los límites permitidos a nivel nacional, lo cuales constituyen el 25,4 % del máximo Nacional y el 30,5% del máximo de la OMS.

Examinando la figura 7 se puede exponer claramente que los niveles de densidades encontrados para MP_{10} superan considerablemente los límites establecidos por la OMS, tanto en el primer día como en el segundo día de medición; como ya se mencionó anteriormente la mayor actividad se registra por la tarde constituyendo dicha franja horaria el periodo donde se supera con frecuencia los límites establecidos, pero esto no implica que por la mañana no sea posible superar los límites de densidad, como se observa en la grafica la línea roja que representa al segundo día de medición inicia



Figuras 7. Densidad del material particulado fino detectado durante los muestreos en relación a los límites estándar establecidos por la OMS y el reglamento nacional.

con valores picos, ya que dicho día se inició con gran actividad minera.

Además un punto trascendental es que el primer día de medición es decir el 2 de febrero fue luego de un día lluvioso, específicamente el primero de febrero de 2015 se registraron precipitaciones importantes en toda la región central del país, en consecuencia el aire se encontraba con menor concentración de partículas inicialmente, razón por la cual se tienen niveles muy por debajo de los límites establecidos, una vez comenzadas las actividades mineras-industriales y como los días 2 y 3 de febrero no se registraron precipitaciones específicamente en la región de estudio los niveles de concentración fueron aumentando considerablemente.

Por otra parte es importante resaltar que el valor máximo de densidad registrado entre los dos días de medición es igual a $874,60 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ el cual supera desmedidamente los límites establecidos tanto a nivel nacional como internacional, dicho valor prácticamente sextuplica el valor permitido en el reglamento nacional, constituyendo el 483 % del máximo Nacional y el 1650 % del máximo de la OMS.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Investigación de la atmósfera y Problemas Ambientales de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción por la utilización del equipo medidor de material particulado.

LITERATURA CITADA

- De la Rosa, J. D. (2008). Contaminación Atmosférica de Material Particulado Provocado por la extracción Minera. *Revista de la Sociedad española de Mineralogía*, X, 85-88.
- Kanomax (2012). Monitor de partículas portátil. Especificaciones del monitor de partículas 3887. Consultado por última vez el 23 de agosto de 2015 de http://www.kanomax-usa.com/product_catalog/spanish/3887_ES.pdf.
- Seoáñez Calvo. (1998). Medio Ambiente y desarrollo: Manual de gestión de los recursos en función del medio ambiente. Mundo Prensa. p.592.
- Wark K. y Warner C, (2005). Contaminación al aire Origen y Control. Mexico: Limusa.

CARACTERIZACIÓN DE UN MINERAL DE PARAGUAY POR RESONANCIA PARAMAGNÉTICA ELECTRÓNICA

CHARACTERIZATION OF A PARAGUAYAN MINERAL BY MEANS OF ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE

WALTER ADRIÁN THOMPSON SOSA*

*Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Asunción. E-mail: wthsosa@hotmail.com

Resumen: Una muestra de mineral de Paraguay fue caracterizada por Resonancia Paramagnética Electrónica (RPE), a temperatura ambiente y a bajas temperaturas (hasta 77K). Fueron detectados en los espectros de RPE especies paramagnéticas, y se determinó el factor espectroscópico g y el ancho de línea. La falta de señal de RPE en torno de 253-263K sugiere un comportamiento antiferromagnético de la muestra. La identificación de las especies paramagnéticas presentes en la muestra fue realizada comparando con espectros de RPE de otros minerales, y sugiere que se trata del mineral Hematita.

Palabras claves: Mineral, RPE, antiferromagnético, hematita.

Abstract: A Paraguayan mineral sample was analyzed by Electronic Paramagnetic Resonance (EPR). Paramagnetic species were detected in EPR spectra taken at room temperature and low temperatures (up to 77 K). Those spectra were used to determine the spectroscopic g factor and the resonance linewidth. The lack of EPR signal in temperatures around 253-263 K suggests that the sample has an antiferromagnetic behavior. The identification of the paramagnetic species present in the sample was performed by comparison of the sample's spectra with spectra of known minerals. The results of the comparison show that the sample is composed of Hematite. Values of $g \approx 2$ indicate the presence of Fe^{3+} , likely from iron oxide (Fe_2O_3).

Key words: Mineral, EPR, antiferromagnetic, Hematite.

INTRODUCCIÓN

Los primeros trabajos de prospección mineral en Paraguay datan de 1860 con el trabajo de L. Alfred DeMersay, oficial polaco al servicio del Pdte. Carlos Antonio López, quien realizó exploraciones de minerales metálicos y descubrió las minas de hierro en 1847. Las muestras de minerales de hierro de Caapucú, fueron analizadas por Bendertand, quien reconoció la presencia de oligisto con alto contenido de hierro, además de algunas impurezas de manganeso, pirita parcialmente alterada, hematita y limonita (Cubas *et al.* 1998).

Entre los años 1854-1865, se han llevado a cabo la explotación de minerales de hierro en minas ubicadas en el Arroyo Apichapá al N de Caapucú, San Miguel (Hoja San J. Bautista) y Mburucasy, al E de Paso Pindó y su conversión industrial (elaboración de material bélico y materiales para construcción del ferrocarril) en la planta de la Rosada (situado a unos 20 Km al SE de Ybucuí). Desde entonces una

vez terminada la guerra de la Triple Alianza se ha abandonado la explotación de hierro y por lo tanto de minerales metálicos en el Paraguay (Cubas *et al.* 1998).

El óxido de hierro, como uno de los óxidos de metales de transición magnéticos más importantes, ha recibido una creciente atención debido a sus amplias aplicaciones, tales como medios de grabación magnética, catalizadores, pigmentos, sensores de gas, dispositivos ópticos y dispositivos electromagnéticos (Yogi & Varshney, 2014). El descubrimiento del magnetismo en la hematita (α - Fe_2O_3) ha atraído mucho interés, ya que es el óxido de hierro más estable en condiciones ambientales (Yogi; Varshney, 2014).

En este trabajo se utilizó la técnica de Resonancia Paramagnética Electrónica (RPE) para caracterizar especies paramagnéticas presentes en las muestras de un mineral de Paraguay y comparar con otros minerales de MINEROPAR S.A. Esta

espectroscopía es una técnica no destructiva, que consiste en la absorción resonante de microondas por la muestra paramagnética colocada en un campo magnético (Vugman & Herbst, 2007).

La hematita (óxido férrico – $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) es un mineral de óxido de hierro conocido hace más tiempo y es muy abundante en rocas y suelos. Su color es rojo-sangre (del griego *haima* =sangre), si es en polvo, es negro o gris brillante, si es cristalina. La hematita es un importante pigmento y es el mayor constituyente de las informaciones de aleación de hierro (Cornell & Schwertmann, 2003).

La muestra de hematita natural fue retirada de la Mina Apichapá, localmente conocida como Mina López, cuyas coordenadas son 26°12'19.44" S y 57°12'30.09" O, ubicado en Caapucú, Paraguay (fue donada por el Departamento de Geología FACEN-UNA).

La hematita natural para comparación, (fue donada por MINEROPAR- Minerales de Paraná S.A.), y la hematita sintetizada fue preparada según Schwertmann & Cornell (1991).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los experimentos de Resonancia Paramagnética Electrónica fueron realizados en un espectrómetro JEOL (JES-PE-3X) operando en banda X (~ 9,5 GHz), del Laboratorio de Fluorescencia y Resonancia Paramagnética Electrónica (LAFLURPE) del Centro de Ciencias Exactas de la Universidad Estadual de Londrina. Las medidas con las muestras de hematita, fueron realizadas en forma de pequeños pedazos de aproximadamente 5 mm de largo y 2 mm de espesor.

Las muestras fueron medidas en tubos de cuarzo de 4 mm de diámetro, en las medidas a temperatura ambiente y en tubos de 3 mm de diámetro, en las medidas con variación de temperatura. Los experimentos con variación de temperatura fueron realizados con un controlador de temperatura variable (JES-VT-3A), que acoplado al espectrómetro de RPE, permite variar la temperatura desde 100 hasta 570 K.

Las medidas fueron realizadas a: temperatura ambiente ($T \sim 298 \text{ K} = 25^\circ\text{C}$). Para bajas tempe-

raturas ($T = 77 \text{ K} = -196^\circ\text{C}$), las muestras fueron insertadas en un tubo de cuarzo que a su vez fue introducido en un *dewar* con nitrógeno líquido.

Las medidas con variación de temperatura fueron realizados en la región entre 143-300 K (-130°C a 27°C), variándose la temperatura en intervalos de 10°C.

El marcador de campo magnético de MgO:Mn^{2+} fue mantenido en la cavidad del RPE y los datos fueron obtenidos simultáneamente con los de las muestras, para que posibles desplazamientos del campo magnético pudieran ser corregidos. El MgO:Mn^{2+} , proporcionado por la JEOL, presenta un espectro de RPE compuesto por seis líneas de resonancia, cuyo valor de g de la cuarta línea es igual a 1,981 y de la tercera línea es igual a 2,034, del espectro respectivamente.

Después de insertar el tubo con la muestra en la cavidad del espectrómetro, fue ajustado el barrido del campo magnético (B), el tiempo de barrido (t_b), la potencia (P), la frecuencia (ν), la modulación (M), la amplitud (A) y el tiempo de respuesta (R).

Los parámetros de los espectros de RPE fueron obtenidos utilizando el *software* Origin Pro 8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Señal de RPE a temperatura ambiente

El mineral Hematita posee un comportamiento ferromagnético débil a temperatura ambiente (Cornell & Schwertmann, 2003). Es por ese motivo que presenta señal de RPE.

En la figura 1 se muestran los espectros de RPE de las muestras de hematita de Paraguay (H1) y MINEROPAR (H2), a temperatura ambiente, los cuales presentan una línea característica de Fe^{3+} en $g \approx 2$, con ancho de línea respectivamente para la muestra de H1, $\Delta H_{pp} = 1819 \text{ Gauss}$ y la muestra de H2, $\Delta H_{pp} = 905 \text{ Gauss}$. En ambos espectros aparecen las seis líneas del ion Mn^{2+} del marcador del campo magnético (MgO: Mn^{2+}).

Una señal de RPE poco intensa aparece en la línea de H1 (figura 1) entre la tercera y cuarta línea del patrón de Mn^{2+} , con $g = 2,007 \pm 0,001$, y ancho de línea $\Delta H_{pp} = 27 \text{ Gauss}$. Otras señales de resonancia poco intensas aparecen en $g = 3,7 \pm 0,1$

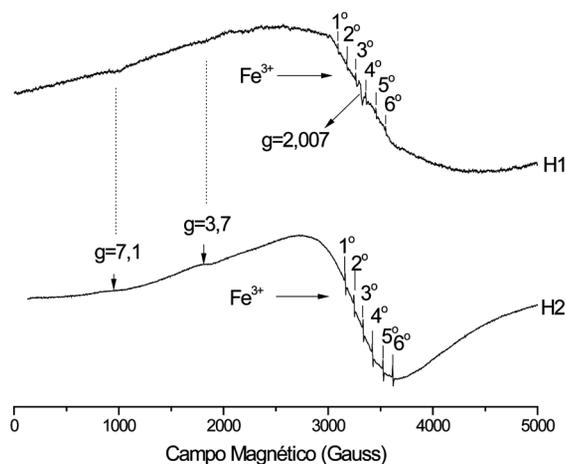


Figura 1- Espectro de RPE de las muestras de hematita de Paraguay (H1) y MINEROPAR (H2) a temperatura ambiente.

y $g = 7,1 \pm 0,1$.

Según Lombardi *et al.* (2006); Balena *et al.* (2011); Guskos *et al.* (2002) estas líneas de $g \approx 2$, se refieren a la dominante concentración de los iones de Fe^{3+} . Estos pueden ser atribuidos a los óxidos y oxihidróxidos de hierro trivalente, solos o combinados en la superficie.

La señal de resonancia en $g = 2,007 \pm 0,001$ se ha atribuido a un centro de E^{\cdot} . Este centro está relacionado con defectos paramagnéticos inducidos por la radiación natural en el cuarzo (Bensimon *et al.* 2000; PAN *et al.*, 2009; Stesmas *et al.*, 2008; Mukhopadhyay *et al.* 2005).

Las muestras H1 y H2 (figura 1) presentan líneas de RPE poco intensas en $g = 3,7$, que son atribuidos a presencia de Fe^{3+} en cuarzo (Siqueira *et al.* 2011).

En la figura 2, Bensimon *et al.* (2000) muestran los centros de defectos en: señal I en $g = 4$, atribuido a la especie Fe^{3+} en un entorno ortorrómbica; señal II en $g = 2$, muy amplio y es debido a los óxidos de hierro; señal III en $g = 2,007 \pm 0,001$ atribuido a un centro E^{\cdot} de defectos de radiación.

Sreekanth *et al.* (2006) atribuye el valor de resonancia de $g = 2,02$ a los iones de Fe^{3+} acoplados por interacción de intercambio. También, a partir de la variación de la temperatura se observa en sus espectros que la intensidad de las líneas disminuye al aumentar la temperatura, y los anchos de líneas se encuentran independientes de la temperatura.

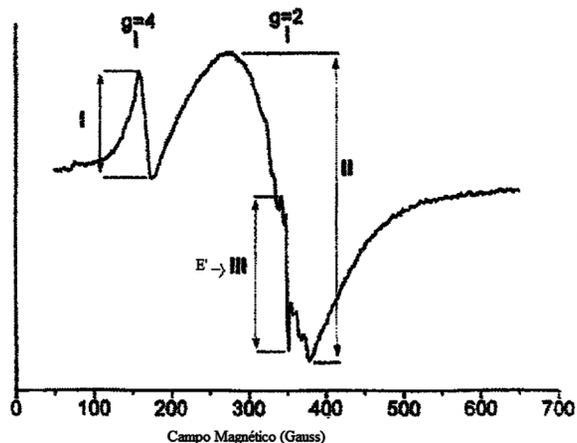


Figura 2- Espectro de RPE en banda X de arcilla cocida a temperatura ambiente. (Fuente: Bensimon, 2000).

Según Ardelean *et al.* (2001) las líneas de absorción en $g \approx 2,0$ se deben a la aislada Fe^{3+} en unas unidades estructurales ligeramente distorsionadas en muestras con bajo contenido de Fe_2O_3 .

La línea espectral de resonancia en $g \approx 7$ puede corresponder al ion Fe^{3+} en simetría octaédrica con distorsión tetragonal (Siqueira, 2008).

Señal de RPE en baja temperatura (77 K)

La figura 3 presenta una mezcla de señales de resonancia de las muestras de hematita de Paraguay (H1), hematita de MINEROPAR (H2) y hematita sintética (H3), obtenidas en baja temperatura (77 K). Estas presentan una línea característica de Fe^{3+} en $g \approx 2$. También la muestras (H1 y H2) presentan señal de resonancia poco intensas en $g = 2,011 \pm 0,001$ y $g = 2,012 \pm 0,001$ (entre la tercera y cuarta línea del patrón Mn^{2+}) respectivamente. Las seis líneas del patrón de Mn^{2+} también son mostrados en los espectros.

En la muestra H2 fueron encontrados valores de $g = 2,5$ y $g = 2,01$ (figura 3), que no fueron evidenciados en el espectro de H2 a temperatura ambiente (figura 1). Tal hecho se debe a la atenuación de la línea en $g \approx 2$ por la dominante concentración de los iones de Fe^{3+} atribuido a los hidróxidos y óxidos de hierro trivalente, solos o combinados en la superficie interna de las arcillas (Lombardi *et al.* 2006).

También son mostrados en H1 valores de $g =$

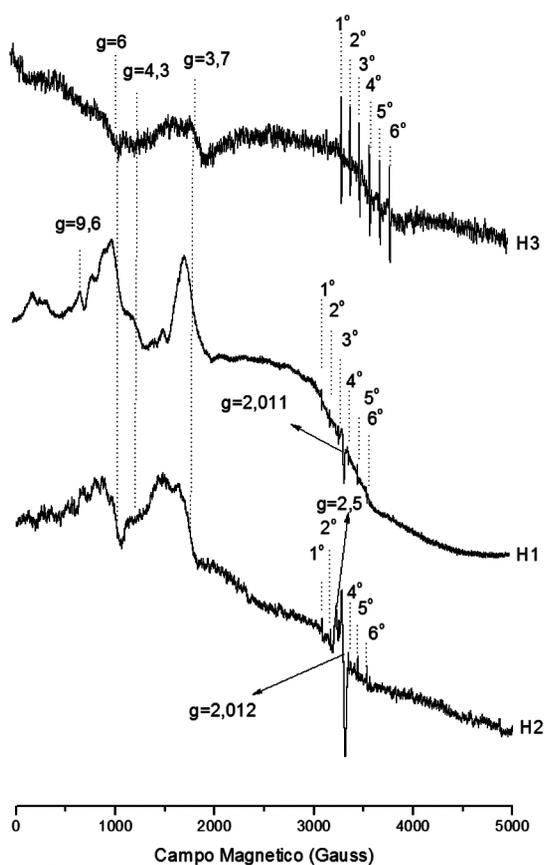


Figura 3. Espectro de RPE de las muestras de hematita de Paraguay (H1), MINEROPAR (H2) y hematita sintética (H3) a 77 K.

9,6, $g = 6$, $g = 4,3$, $g = 3,7$, en H2 valores de $g = 6$, $g = 4,3$ y $g = 3,7$ y en H3 valores de $g = 6$, $g = 4,3$ y $g = 3,7$ respectivamente (figura 3).

La señal poco intenso en $g \approx 4,3$, son atribuidos a iones de Fe^{3+} en simetría con distorsión rómbica (Siqueira *et al.* 2011).

Las líneas de RPE en $g = 4,3$, que aparecen en el espectro de algunas muestras de suelo, son atribuidas a la sustitución isomorfa de Al^{3+} por Fe^{3+} dentro de la estructura cristalina de los minerales (SILVA, 2001).

En las muestras de granos de tamaño entre 0,71-1,00 mm de color clara fue detectado una señal de RPE en $g \approx 6$, este fue atribuido al Fe^{3+} en simetría octaédrica con distorsión tetragonal (SIQUEIRA *et al.* 2011).

Las muestras H1 y H2 (figura 3) presentan líneas de RPE en $g = 3,7$ que son atribuidos a presencia de Fe^{3+} en cuarzo (Siqueira *et al.* 2011).

Las líneas de RPE en $g = 3,7$ y $g = 6$ que aparecen en la muestra H3 (figura 3) son debidas al recipiente térmico, ya que el mismo está hecha de cuarzo.

Según (figura 3) la línea en $g = 4,3$ se acompaña de la característica en $g = 9,6 \pm 0,1$ (H1) que tienen una evolución similar y tienen origen en el mismo entorno iónico. Debido a la anisotropía de la línea a $g \approx 9,7$ es mucho menos intensa y no se resuelve. Por lo tanto, los iones Fe^{3+} en los sitios de simetría rómbica parecen tener una importante contribución en la absorción, resultando en los espectros, líneas en $g \approx 4,3$. Hay un intervalo relativamente estrecho de la concentración de (mol% Fe_2O_3) donde estas unidades estructurales que implican iones Fe^{3+} se pueden revelar como configuraciones distintas e independientes (Ardelean *et al.* 2001).

Señal de RPE con disminución de temperatura de la muestra de hematita de Paraguay

En la figura 4 se muestran los espectros de RPE de las muestras de hematita de Paraguay con disminución de la temperatura, desde la temperatura ambiente hasta -130°C los cuales presentan una línea característica de Fe^{3+} en $g \approx 2$, todos los espectros poseen ancho de línea $\Delta H_{pp} > 1819$ Gauss.

La señal de resonancia intensa en $g \approx 2$ puede ser atribuido a la gran concentración de óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} (Balena *et al.* 2011).

La señal poco intensa en $g \approx 4,3$ (figura 4), son atribuidos a iones de Fe^{3+} con simetría con distorsión rómbica (Siqueira *et al.* 2011).

Es importante resaltar que entre los intervalos de -10°C a -20°C (253 K – 263 K) no es posible medir, no hay señal en el espectrómetro de RPE (figura 4). Esta falta de señal puede ser debido a que los espines se acoplan antiferromagnéticamente, como resultado los espines se cancelan con los pares, y así no hay ninguna diferencia de población de espines entre los niveles de energía. Este fenómeno es conocido como la transición magnética que sufre la muestra al pasar del estado débil ferromagnético

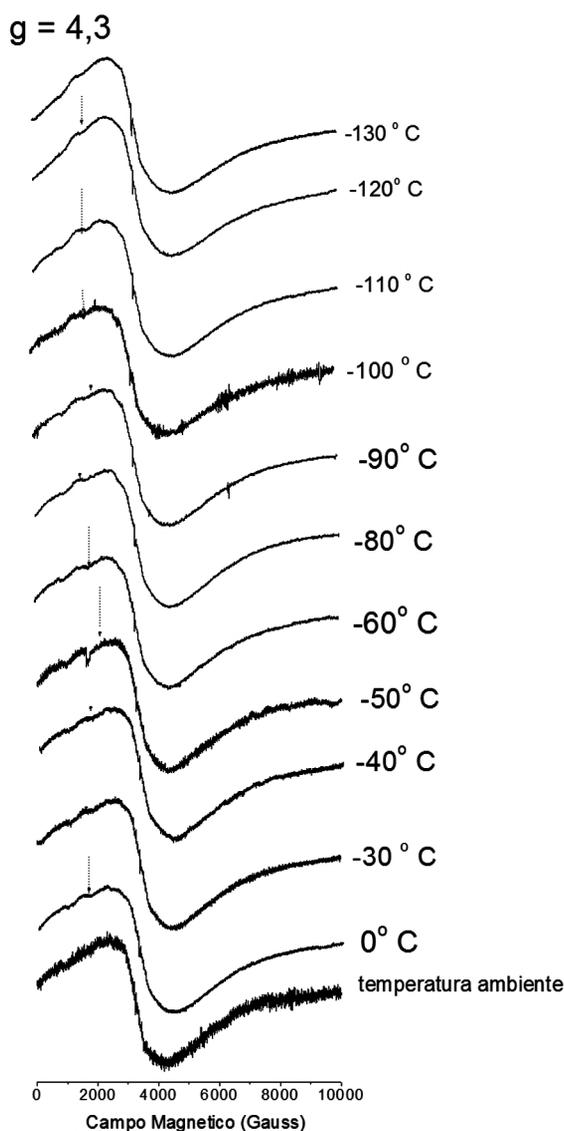


Figura 4. Espectro de RPE de las muestras de hematita de Paraguay con disminución de la temperatura.

al estado antiferromagnético llamado transición de Morin (Cornell & Schwertmann, 2003).

CONCLUSIÓN

Analizando la muestra del mineral hematita de Paraguay por RPE, ésta presenta líneas de absorción en $g \approx 2$ que fue atribuido a la gran concentración de óxidos de Fe^{3+} posiblemente Fe_2O_3 . La señal existente de RPE en temperatura ambiente fue atribuida

al efecto débil ferromagnético. El valor de $g = 2,007 \pm 0,001$ fue atribuido a un centro de defecto E' , inducido por la radiación natural en el cuarzo. El valor de $g = 3,7$ fue atribuido a la presencia de Fe^{3+} en el cuarzo. El valor de $g = 4,3$ fue atribuido a iones Fe^{3+} en simetría con distorsión rómbica.

La falta de señal de RPE en el intervalo de 253-263K se le atribuye a la transición de Morin que sufre la muestra.

BIBLIOGRAFÍA

- Ardelean, I., Peteanu, M., Simon, V., Ciorcas & F., Ioncu, V. (2001). Structural investigation of $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{TeO}_2 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SrO}$ glasses by EPR. *Journal of Materials Science Letters*, 20: 947-949.
- Balena. S.P., Messerschmidt, J., Tomazoni, J. C., Guimarães, E., Pereira, B. F., Ponzoni, F.J., Blum, W. E. H. & Mangrich, A. S. (2011) Use of Fe^{3+} Ion Probe to Study Intensively Weathered Soils utilizing Electron Paramagnetic Resonance and Optical Spectroscopy. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 22(9): 1788-1794.
- Bensimon, Y., Deroide, B., Dijoux, F. & Martineau, M. (2000). Nature and thermal stability of paramagnetic defects in natural clay: a study by electron spin resonance. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 61: 1623-1632.
- Cornell, R. M. & Schwertmann. (2003). *The Iron oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. 2nd Edition, Darmstadt: Wiley-VCH. 664pp.
- Cubas, N., Garcete, A., Meinhold, K. D., Figueredo, L., Benitez, J.C., González, M. E., Burgath, K. & Höhndorf, A. 1998. Mapa Geológico de la Republica de Paraguay. Hoja Villa Florida 5468. Texto Explicativo. Dirección de Recursos Minerales (MOPC). Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR). Asunción, 1998, 74p. Disponible en: http://www.geologiadelparaguay.com.py/Villa_Florida.pdf. Acceso en: 10 jul. 2014.
- Guskos, N., Papadopoulos, G. J., Likodimos, V., Patapis, S., Yarmis, D., Przepiera, A., Maj-

- szczyk, J., Typek, J., Wabia, M., Aidinis, K. & Drazek, Z. (2002). Photoacoustic, EPR and electrical conductivity investigations of three synthetic mineral pigments: hematite, goethite and magnetite. *Materials Research Bulletin*, 37: 1051-1061.
- Lombardi, K., Guimarães, J. L., Mangrich, A. S., Mattoso, N., Abbate, Schneider, W.H. & Wypych, F. (2002). Structural and Morphological Characterization of the PP-0559 Kaolinite from the Brazilian Amazon Region. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. Brazil, 13(2): 270-275, 2002.
- Mukhopadhyay, S., Sushko, P. V., Mashkov, V. A. & Shluger, A.L. (2005). Spectroscopic features of dimer and dangling bond E' centres in amorphous silica. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17: 1311-1318.
- Pan, Y., Nilges, M. J. & Mashkovtsev, R. I. (2009). Radiation-induced defects in quartz: a multifrequency EPR study and DFT modelling of new peroxy radicals. *Mineralogical Magazine*, 77: 519-535.
- Schwertmann, U. & Cornell, R.M. (1991). *Iron Oxides in the Laboratory: Preparation and Characterization*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim/VCH Publishers, New York. 137 pp.
- Silva, L. (2001). *Estruturas Químicas dos Ácidos Húmicos de Sedimentos de Mangue e o Nível de Poluição ambiental*. Dissertação (Mestrado em Inorgânica). Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 66 pp.
- Siqueira, R. E. (2008). *Ressonância Paramagnética Eletrônica no estudo do solo da região de Araucária-PR*. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Londrina. 84 pp.
- Siqueira, R. E., Andrade, M. M., Valezi, D. F., Carneiro, C. E. A., Pinese, J. P. P., Da Costa, A. C. S., Zaia, D. A. M., Ralisch, R., Pontuschka, W. M., Guedes, C. L. B., Di Mauro, E. (2011). EPR, FT-IR and XRD investigation of soils from Paraná, Brazil. *Applied Clay Science*, 53: 42-47.
- Sreekanth Chakradhar, R. P., Yasoda, B., Lakshmana Rao, J., Gopal, N. O. (2006) Mixed alkali effect in $\text{Li}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$ glasses containing Fe_2O_3 and EPR and optical absorption study. *Materials Research Bulletin*, 41: 1646-1656.
- Stesmans, A., Clémer, K. & Afanas'ev, V. V. (2008). Primary ^{29}Si hyperfine structure of E' centers in nm-sized silica: Probing the microscopic network structure. *Physical Review B, Condensed matter and materials physics*, 77(094130): 1-9.
- Vugman, N. V. & Herbst, M. H. (2007). *Fundamentos e Aplicações da Ressonância Magnética Nuclear: Introdução á Ressonância Paramagnética Eletrônica de onda contínua. Aplicações ao estudo de complexos de metais de transição*. Rio de Janeiro: Associação de usuarios de Ressonância Magnética Nuclear, 3: 91 pp.
- Yogi, A. & Varshney, D. (2014). Cu doping of hematite ($\alpha\text{-Fe}_{2-x}\text{Cu}_x\text{O}_2$): Effect on the structural and magnetic properties. *Materials Science in Semiconductor Processing*. v. 21, p. 38-44.

VALORACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE FILMES RADIOGRÁFICOS VENCIDOS Y ALMACENADOS EN UN DEPÓSITO DE LA ADMINISTRACIÓN CENTRAL DE SALUD

ASSESSMENT OF QUALITY PARAMETERS AND EXPIRED FILM RADIOGRAPHIC DEPOSIT STORED IN THE CENTRAL HEALTH MANAGEMENT

FREDY JULIÁN GÓMEZ GRANCE¹, ANALIZ LÓPEZ¹, OSCAR ALBERTO VELÁZQUEZ ORTIZ¹ & FRANCISCO CABAÑAS¹

¹Facultad de Ciencias Exactas y Naturales -UNA (FACEN), Campus Universitario de la UNA-San Lorenzo, Ruta Mcal, Estigarribia Km11, 1039, Dpto. Central, Paraguay. E-mail: fjgrance@yahoo.com

Resumen: En radiodiagnóstico se ha pasado de los sistemas de imagen con placas radiográficas a sistemas digitales. Como consecuencia de lo anterior se ha generado en la administración central de salud la acumulación de 160.700 placas radiográficas vencidas y sin uso clínico. El objetivo del presente trabajo fue, determinar las características densitométricas, mediante las mediciones de parámetros físicos de calidad de imagen, y dictaminar sobre el uso seguro de dichas placas. El muestreo se realizó al azar con 50 placas radiográficas, de una muestra de 30 cajas en un universo de 1607. Las placas fueron recolectadas de cada caja, correspondientes a tres marcas y periodo de caducidad diferentes. Las pruebas realizadas originaron 50 curvas características, obteniéndose así los parámetros densitométricos que fueron comparados con los informados por el fabricante y en todos los casos, ningún parámetro se encontraba dentro del rango tolerable, originando un 40 % más exposición a las radiaciones ionizantes.

Palabras Claves: *Densidad Óptica, Gradiente, Base+Velo, Latitud, Película Radiográfica.*

Abstract: In radiodiagnostic it has moved from imaging systems with radiographic plates to digital systems. As a result of the above it has been generated in the central health administration an accumulation of 160,700 radiographic expired plates and without clinical use. The aim of this study was to determine the densitometry characteristics by measurement of physical parameters of image quality, and ruling on the safe use of such plates. Sampling was done randomly with 50 radiographic plates, a sample of 30 boxes in a universe of 1607. The plates were collected from each box corresponding to three different brands and expiration period. The tests originated 50 curves, thus obtaining densitometry parameters were compared with those reported by the manufacturer and in all cases any parameter was within the tolerable range, resulting in a 40% more the exposure to ionizing radiation.

Key Words: *Optical Density, Gradient, Base + Fog, Latitude, Radiographic Film.*

INTRODUCCIÓN

En la región a partir de la década pasada ha cambiado progresivamente el modo de visualización de las imágenes radiográficas, de tal manera que ha pasado de la forma convencional de revelado de placas radiográficas, a imágenes digitales.

Lo anterior podría ser el motivo por el cual se ha dado un evento de acumulación de placas radiográficas sin uso, vencidas en el depósito del Ministerio de Salud del Paraguay.

En la radiología convencional se utiliza en general sistema de revelado con placas radiográficas las cuales deben poseer un exhaustivo control de

calidad del proceso de revelado, cuya finalidad es detectar cambios en las características radiométricas de los filmes que pudieran disminuir la calidad diagnóstica de la imagen. (Mojiri *et al.*, 2008)

Los parámetros físicos que indican dichos cambios son evaluados a través de la curva característica, con la cual se determina el velo+base, la velocidad, el gradiente y latitud de la película. Estos parámetros poseen valores de referencia dados por el fabricante, sin embargo debido a las características de fabricación, dichos valores son propios de cada fabricante y difieren unos de otros. (Barbieri *et al.*, 1996)

Una característica importante de la fabricación es el tiempo de caducidad, en general un año según el fabricante, esto se debe a la degradación natural de los haluros de plata de la emulsión, debido a condiciones ambientales de: humedad, presión y temperatura. Motivo por el cual los depósitos de grandes cantidades las placas radiográficas deberían ser acondicionadas con un ambiente controlado. (Carlton & Adler, 1992)

Este trabajo se enmarca en la necesidad de conocer las características densitométricas y calidad radiográfica de placas depositadas en ambientes no controlados y vencidas, además en este estudio en ningún caso el vencimiento de las placas sobrepasó siete meses y el 90% de las muestras tuvieron un vencimiento de cuatro meses.

Es así que fueron determinadas las características densitométricas, mediante las mediciones de parámetros físicos de calidad de imagen, y la posibilidad o no del uso seguro de estas placas radiográficas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Densitometría de las Muestras Fílmicas

Las muestras se obtuvieron de una población total de 160.700 placas, su tamaño se extiende a 50 placas, calculado para un nivel de confianza de 95 %, una amplitud de 13,7% y la prevalencia esperada de 50 % ($p=0,5\%$) que maximiza el tamaño de la muestra, la estadística utilizada es de tipo probabilístico y auto representada a nivel de marcas.

Se retiraron las muestras del depósito y se realizó una exposición con el Sensitómetro de marca: X-Rite y Modelo: 334, teniendo en cuenta si las placas eran sensibles al verde o al azul, dentro del cuarto oscuro de un servicio de radiodiagnóstico, luego cada muestra fue revelada con un revelador automático de la marca AGFA, para posteriormente medir las densidades ópticas de las escalas de grises conseguidas con el Sensitómetro, esto se realizó con un Densitómetro de marca X-Rite Modelo 331.

Por último se graficaron las densidades ópticas (DO) medidas en función del logaritmo de las dosis relativas dadas por la escala del sensitómetro, Las curvas así obtenidas son denominadas curvas

características (X-RITE® Incorporated 331, 1995), (X-RITE® Incorporated 334, 1995).

Determinación de Parámetros Característicos de las Curvas de Ennegrecimiento

Las cincuenta Curvas de Ennegrecimiento correspondientes al número de placas radiográficas muestreadas, son analizadas para determinar los siguientes parámetros: Base + Velo, Latitud, Gradiente, Velocidad.

Cada uno de estos parámetros depende de las densidades ópticas medidas y estimadas de las extrapolaciones de la Curva de Ennegrecimiento. Así la base más el velo se determina como la densidad óptica medida con un Densitómetro, en una placa expuesta a luz ambiental, sin la exposición al Sensitómetro (F.J.Gómez Grance et al, 2010).

La velocidad es el valor del recíproco del Log de la exposición relativa ($\text{Log } E_R$) cuando la densidad óptica es igual a la unidad en la Curva de Ennegrecimiento y está dada por:

$$\text{Velocidad} = \frac{1}{\text{Log } E_R} \quad (1)$$

Por otra parte la pendiente de la Curva de Ennegrecimiento, en la región de densidades ópticas de utilidad diagnóstica, es determinada mediante el gradiente G , que tiene en cuenta la Latitud como la diferencia de exposiciones relativas, como se puede notar en la siguiente ecuación:

$$G = \frac{D_2 - D_1}{\text{Log } E_{R2} - \text{Log } E_{R1}} \quad (2)$$

Donde el denominador se define como Latitud y donde D_2 y D_1 son las densidades ópticas para los tonos de grises correspondientes.

Evaluación de los Parámetros de Calidad.

Del análisis de las curvas características de cada placa se obtuvieron Curvas de Ennegrecimientos semejantes a las mostradas en la figura 1, con las cuales estimamos los valores de Base + Velo, Velocidad, Latitud y Gradiente.

El valor de la velocidad se obtiene con la ecuación

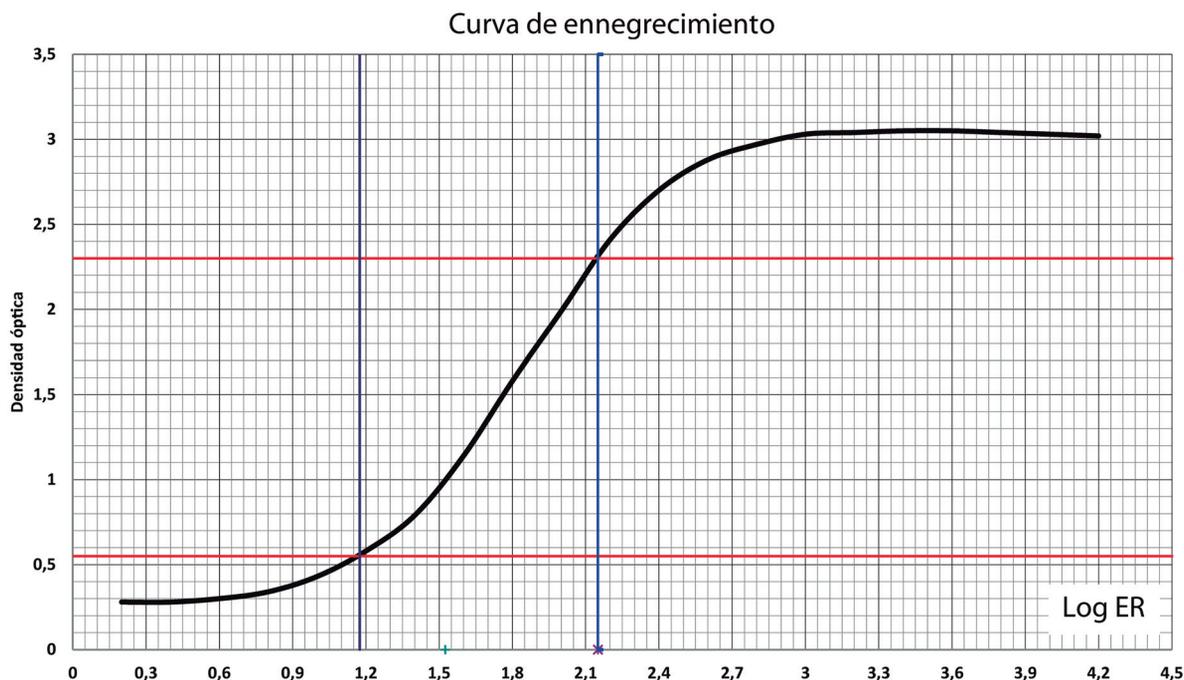


Figura 1. Gráfico de la curva de Ennegrecimiento de una muestra.

ción 1, determinando el valor de Log Er que corresponde a la Densidad Óptica igual a 1 en la Figura 1.

El Gradiente y la Latitud son también determinados de la figura 1, midiendo la diferencia de Densidades Ópticas que corresponde a la Base+Velo más 0,25 para el pie de la curva y para el hombro de dicha curva se suma 2 a la Base+Velo.

Los cincuenta valores de Gradiente, Latitud, Velocidad y Base+Velo correspondientes a las cincuenta muestras de placas radiográficas de tres marcas diferentes, son comparados con los valores de referencia dados por el fabricante mostradas en la Tabla 1.

Los valores de referencia adoptados son los más restrictivos de modo a establecer un límite por

encima del cual no deberían aumentar o disminuir dichos valores.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Teniendo en cuenta los valores de referencia y comparándolos con los valores obtenidos de las curvas características de ennegrecimiento, se puede observar en la Figura 2a, que los valores medidos de base+velo son mayores a los de referencia en todos los casos (todas las marcas), lo cual hace que las placas reduzcan el intervalo de densidades útiles variando los demás parámetros sensitométricos.

El segundo parámetro estudiado es la latitud la cual es inversa al Gradiente, esto se puede observar

Tabla 1. Valores de referencia estándar para las tres marcas diferentes.

Marca de Placas	Base + Velo	Velocidad	Gradiente	Latitud
A	$\leq 0,22$	$0,59 \pm 0,05$	$\geq 2,7 \pm 7\%$	$\leq 0,83 \pm 7\%$
B				
C				

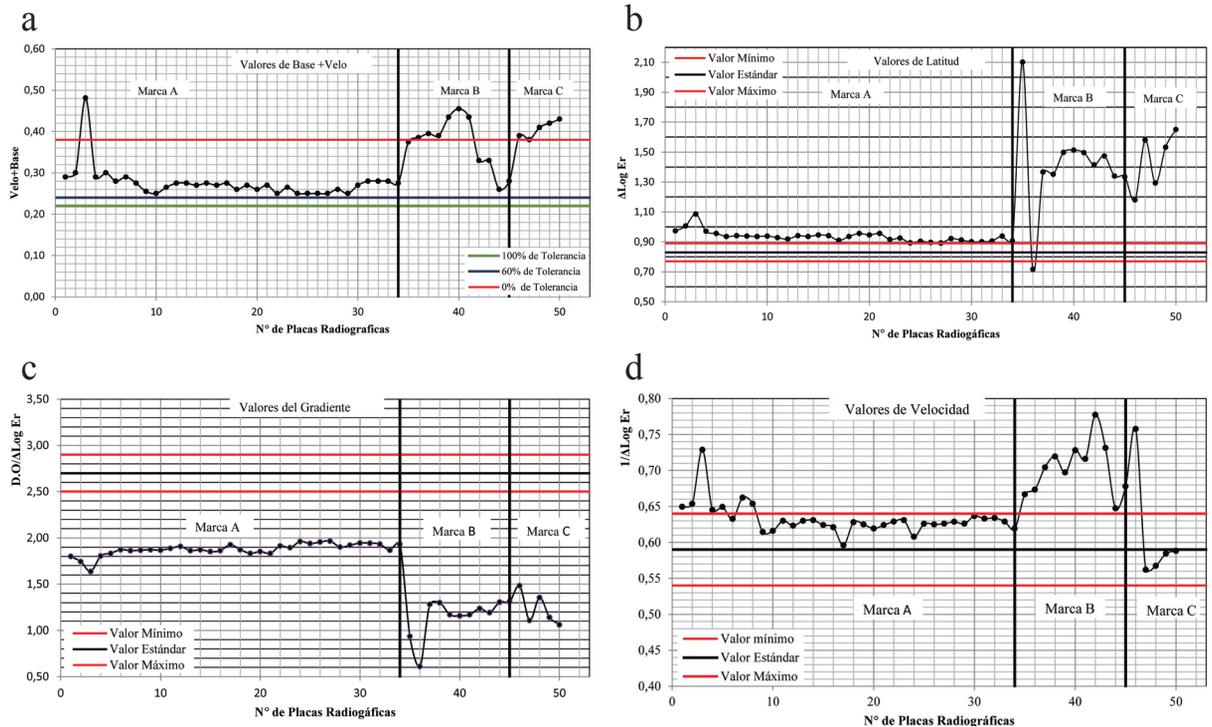


Figura 2. Gráfico de los valores de todas las placas evaluadas para diferentes parámetros. **a)** Velo+Base. **b)** Latitud. **c)** Gradiente. **d)** Velocidad.

comparando la Figura 2b con la Figura 2c, también en la Figura 2b se puede notar que todas las placas están fuera de tolerancia respecto a la referencia de Latitud dada por el fabricante, lo cual indica que para obtener las mismas densidades útiles se utilizarían mayores dosis de radiación al paciente.

En cuanto al gradiente, su comportamiento se puede observar en la Figura 2c, en donde todas las muestras están muy por debajo de los valores de referencia, esto indica que el contraste de las placas ha disminuido y como consecuencia la diferenciación entre tejidos blandos se verá comprometida.

Por último la variación de velocidad para cada placa radiográfica se muestra en la Figura 2d, en donde se observa que la Marca A se encuentra dentro del límite superior de manera más regular que las Marca C, sin embargo la Marca B está totalmente fuera rango.

Si consideramos que los valores de Base+Velo están por encima del 60% de tolerancia, que el valor de latitud está por encima de la referencia y

el gradiente por debajo, lo cual implicaría mayor dosis de radiación para obtener el mismo rango de densidades ópticas útiles de la curva de ennegrecimiento y además los valores de velocidad aumentados lo que con mayores dosis implicaría mayor ennegrecimiento de la placa, reduciendo por tanto la nitidez de las placas y comprometiendo el contraste de partes blandas.

Por tanto mediante la valoración de los resultados podemos confirmar que la diferencia encontrada respecto a los valores de referencia del fabricante, causan en promedio un 40 % más exposición a las radiaciones ionizantes cuando no hay necesidad de repetición de placas, dicha condición es inaceptable para la protección radiológica del paciente.

Una opción para verificar de manera independiente estos resultados, es la exposición de un fantoma antropomórfico dedicado a verificar bajo y alto contraste, de modo a comparar placas radiográficas dentro del periodo de caducidad y fuera de mismo.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción, por el apoyo brindado en la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Mojiri, M.; Ghazi, K.; Beigi, A.M. 2008. Evaluation sensitometric properties of radiographic films at different processing solutions. *Journal of Paramedical Sciences*, 2(3): 30-36.
- Barbieri, D.X.; Staeve, G.L.; Wagner, R.V.; Mazzola, A. 1996. Influence of high values of base plus fog in the quality of radiological image. *Proceedings of the 3rd Regional Meeting on Radiological and Nuclear Safety and Radiological protection in Latin America and the Caribbean*, 1: 209-214. Disponible en: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/021/28021235.pdf
- Carlton, R.R.; Adler, A. 1992. *Principles of Radiographic Imaging*. Delmar Publishers, Albany.
- X-RITE® Incorporated. 1995. *Operation Manual of Densitometer X-Rite®*. USA. Michigan. 17p. N°331
- X-RITE® Incorporated. 1995. *Operation Manual of Densitometer X-Rite®*. USA. Michigan. 23p. N°334
- Gómez Grance, F.J.; Velázquez, O.A.; Tonina, J. 2010. Análisis de Parámetros Físicos que Influyen en la Calidad de las Placas Radiográficas Obtenidas en servicios de Radiodiagnóstico en Paraguay. *Reportes Científicos de la FACEN*, 1(2): 15-30.

OBSERVACIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES GENERADAS POR LA FUSIÓN DE UN SISTEMA BINARIO DE AGUJEROS NEGROS

OBSERVATION OF THE GRAVITATIONAL WAVES GENERATED BY THE FUSION OF A BINARY SYSTEM OF BLACK HOLES*

WALTER THOMPSON¹

¹Universidad Estadual de Londrina – UEL, PR, Brasil. E-mail: wthsosa@hotmail.com

Resumen: Se difunden aquí de manera sintética los recientes descubrimientos publicados en el artículo multiautor de Abbott *et al.* (2016) sobre un trabajo conjunto entre los equipos de los sensores del LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) de estados Unidos y el Virgo de Italia, en el cual se detectaron por primera vez la colisión de dos agujeros negros y las ondas gravitacionales originadas de la misma, siguiendo el patrón predicho por la teoría general de la relatividad.

Palabras clave: agujeros negros, sistema binario, ondas gravitacionales, relatividad general.

Abstract: Here are given, in synthesized way, the recent discoveries published in the multiauthored paper by Abbott *et al.* (2016) about the mutual work made by the teams of the sensors of the LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) from the USA and the Virgo from Italy, which detected for the first time the collision of two black holes and the gravitational waves originated from the interaction, following a pattern predicted by the general theory of relativity.

Key words: black holes, binary system, gravitational waves, general relativity.

INTRODUCCIÓN

En 1916, un año después de la formulación final de las ecuaciones de campo de la relatividad general, Albert Einstein predice la existencia de la onda gravitacional. Él encontró que las ecuaciones linealizadas para un campo débil tenían soluciones de onda: ondas transversales de tensión espacial que viajan a la velocidad de la luz, generada por las variaciones temporales de la masa del cuadrupolo momento de la fuente.

El día 12 de Febrero de 2016 fueron anunciados dos descubrimientos de gran importancia científica extrema directamente relacionadas con una de las previsiones más importantes de la teoría de la Relatividad General de Einstein: la primera detección directa de ondas gravitacionales y la primera observación de la colisión y fusión de un par de

agujeros negros.

Este evento, conocido como GW150914, ocurrió en una galaxia distante más de un billón de años-luz de la Tierra. Él fue observado en 14 de Setiembre 2015 a las 05:50:45 hora de Asunción por los dos detectores del Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Laser (sigla LIGO en Inglés).

De la morfología de la señal podemos deducir las masas de los agujeros negros: 32 y 29 masas solares con una incertidumbre de aproximadamente 20%, de las cuales podemos estimar, a través de la Relatividad General, que la energía emitida en la forma de ondas gravitacionales a lo largo de la fusión fue cerca de 3 veces la masa del Sol, la mayoría emitida en una fracción de segundos. El pico de luminosidad correspondiente es aproximadamente de 10^{56} erg/s. Para comparación, la luminosidad del sol es de 4×10^{33} erg/s y aquella de gama ray burst más luminoso nunca observado es de $\sim 5 \times 10^{54}$ erg/s en el caso de emisión isotrópica.

La fusión de dos agujeros negros formó un único agujero negro de masa correspondiente a 62

*Artículo de difusión de un tópico actual, sintetizando los descubrimientos publicados formalmente del artículo de Abbott *et al.* (2016) [citado al final de este artículo]. Se realiza esta difusión respetando los términos de la Licencia *Creative Commons 3.0*, que permite uso, distribución y reproducción sin restricciones en cualquier medio, siempre que el trabajo original sea apropiadamente citado.

veces al del Sol. Además de eso, se concluye que el agujero negro remanente tiene spin correspondiendo a un agujero negro de Kerr, con un valor aproximadamente de 0.67. Esos resultados indican que GW150914 ocurrió a un redshift de cerca 0.09.

Este avance marca el comienzo de una nueva era en astronomía abriendo una nueva ventana de observación del universo sobre la forma de ondas gravitacionales.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las ondas gravitacionales son oscilaciones de espacio-tiempo causadas por cualquier masa acelerada. En las últimas décadas, ya se había acumulado fuertes evidencias de que las ondas gravitacionales existen, debido a sus efectos en órbitas próximas de pares de estrellas de neutrones en nuestra galaxia. Los resultados de estos estudios concuerdan muy bien con la teoría de Einstein teniendo exactamente el mismo decaimiento orbital previsto por la teoría y que es debido a la pérdida de energía transportada por ondas gravitacionales. Sin embargo, la detección directa de ondas gravitacionales ha sido ampliamente deseada por la comunidad científica ya que este descubrimiento proveería nuevas maneras y más robustas para probar la relatividad general sobre condiciones extremas, abriendo una nueva manera para explorar el universo.

Los valores estimados de las masas antes de la fusión de dos componentes de GW150914 son en sí un argumento muy fuerte para asegurar que los dos son agujeros negros, especialmente si consideramos la pequeña separación en dos componentes necesaria para generar una señal de la frecuencia observada: la señal entra en la banda de LIGO acerca de 30 Hz y alcanza una frecuencia máxima de 250 Hz. Los agujeros negros son los únicos objetos conocidos que son suficientemente compactos para estar tan cerca y no se fundan.

Esa es la primera observación de un par de agujeros negros, pero no se trata de la primera observación de agujeros negros en general.

En tanto, por definición, no podemos “ver” la luz de un agujero negro, ya que son densos y compactos que ni la luz puede escapar de su atracción

gravitacional, astrónomos reunieron una importante colección de evidencias de su existencia estudiando los efectos de esos candidatos a agujeros negros en el área alrededor de ellos. Por ejemplo, se cree que la mayoría de las galaxias, incluyendo la Vía Láctea contiene un agujero negro supermasivo ($\sim 10^6$ veces la masa del Sol) en su centro – con masas de millones o hasta billones de veces mayor que al del Sol. También existen evidencias de agujeros negros con masas mucho menores (de pocas veces hasta una docena de veces la masa del Sol), que se cree son restos de estrellas muertas que sufrieron una explosión cataclísmica, llamado de un colapso de núcleo de supernovas.

Además de estos progresos substanciales en la observación indirecta de agujeros negros, nuestra comprensión teórica de esos extraños objetos fue drásticamente mejorada en la última década por avances notables en la capacidad de simular en computadora desde varias órbitas muy próximas hasta la fusión de un sistema binario de agujeros negros. Estos modelos permitieron la creación de ondas gravitacionales emitidas por agujeros negros: el conocimiento de cómo esas evalúen a medida que los agujeros negros quedan más próximos hasta que finalmente se funden en un único agujero negro más masivo es necesario para maximizar las informaciones que podemos tirar de la observación.

LIGO es el mayor observatorio de ondas gravitacionales y uno de los más sofisticados experimentos de física del mundo. Compuesto por dos grandes interferómetros a laser localizados a ~ 3000 km de distancia, en Livingston, Louisiana e Hanford, Washington, LIGO usa las propiedades físicas de la luz y de espacio para detectar ondas gravitacionales – un concepto que fue propuesto por primera vez en las décadas de 60 y 70. Un primer conjunto de detectores fue concluido en el inicio de 2000, incluyendo TAMA300 en Japón, GEO600 en Alemania, LIGO en los Estados Unidos y VIRGO en Italia. Enseguida, y usando combinaciones de estos detectores, fueron hechas observaciones conjuntas entre 2002 y 2011, sin que se obtenga cualquier detección de ondas gravitacionales. Después de mejoras significativas realizadas, los detectores

LIGO comenzaran a operar en 2015 como LIGO Avanzado: los primeros de una red global de detectores significativamente más sensibles. Los LIGO están ahora apagados, el reinicio de tomada de datos está prevista conjuntamente para el final de este año.

Un interferómetro como el LIGO consiste de dos brazos perpendiculares (en este caso los brazos miden 4 km) en que un as de laser es enviado y reflejado por los espejos en el final de los brazos. Cuando una onda gravitacional pasa, la ampliación y el encogimiento del espacio hace con que los brazos del interferómetro se encojan alternadamente, una queda menor en cuanto el otro queda mayor y viceversa. Como los brazos se alteran de longitud por efecto de las ondas gravitacionales, los ases a laser viajan distancias diferentes a través de los brazos, lo que significa que los dos haces no están más en fase y luego es producido lo que llamamos de patrón de interferencia.

La diferencia entre la longitud de onda de los dos brazos es proporcional a la intensidad de onda gravitacional que está pasando: en una onda gravitacional típica, se supone que esta amplitud de deformación deba ser, aproximadamente, menor que el diámetro de un protón. Todavía así los interferómetros LIGO son tan sensibles que ellos pueden medir esos valores extremadamente pequeños.

Para detectar con suceso una onda gravitacional como GW150914, los detectores LIGO necesitan combinar una gran sensibilidad con la capacidad de aislar las señales reales de las fuentes de ruido instrumental: pequeñas perturbaciones debidas, por ejemplo, a efectos ambientales o al propio instrumento, pueden imitar o superar los patrones de ondas gravitacionales que estamos buscando. Con dos detectores disponibles tenemos la ventaja de poder separar la señal real de la onda gravitacional de posibles ruidos y perturbaciones.

Operar una red de dos o más detectores también nos permite, por triangulación, posicionar la dirección en el cielo de la onda gravitacional observada una vez conocida la diferencia de tiempo de llegada en cada detector. Cuanto más detectores en la red, más precisa será la localización en el cielo de la fuente emisora de esta onda gravitacional. En 2016,

el detector Virgo Avanzado, en Italia, va juntarse a la red global, además de estar prevista la construcción de otros interferómetros avanzados como KAGRA en Japón y un tercero, LIGO, en la India.

La caracterización del ruido de fondo es una parte esencial de la investigación de LIGO, y envuelve el monitoreamiento de una gran colección de datos ambientales grabados en dos locales: movimiento del suelo, variaciones de temperatura y fluctuaciones de potencia del láser, entre otros, que son monitoreados en tiempo real para controlar el estado de los interferómetros. Un problema en uno de esos canales ambientales o instrumentales causa el descarte de los datos recolectados por el detector.

Además de eso, para excluir la posibilidad de una fluctuación de ruido no comunes, LIGO estimó la probabilidad de que esa coincidencia acontezca accidentalmente a través de una serie de desplazamientos de tiempo entre los datos de LIGO Hanford y LIGO Livingston, para crear un conjunto de datos de mayor duración y para buscar señales coincidentes que sean atribuidos con certeza al ruido y no a las ondas gravitacionales.

Usando desplazamientos de tiempo mayores de que 10 milisegundos (el tiempo de recorrido entre los dos detectores, el GW150914 fue detectado en los dos LIGO con una diferencia de tiempo de 7 ms).

La tasa de falsa alarma estimada es de un evento a cada 200.000 años. Esta tasa de falsa alarma puede ser traducida por la conocida variable “Sigma” (indicada por σ) de una distribución normal Gaussiana proporcionando un valor de 5.1 veces σ .

La primera detección de ondas gravitacionales y la primera observación de la fusión de un sistema de dos agujeros negros son conquistas significativamente notables, pero representan apenas la primera página en un fabuloso nuevo capítulo en la astronomía.

LITERATURA CITADA

Abbott, B.P. *et al.* (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole. *Physical Review Letters*, 116 (061-102): 1-16.

GUÍA PARA LOS AUTORES

Reportes Científicos de la FACEN, es una revista de libre acceso y órgano de publicación científica oficial de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Asunción. Es emitida semestralmente y publica **Artículos originales, Artículos de revisión, Tópicos actuales, Reportes de casos, Comunicaciones cortas y Correspondencia**, en las áreas de Biología, Química, Física, Matemática Pura, Matemática Estadística, Geología, Biotecnología y Tecnología de Producción. Los principales criterios para la selección de los artículos son la solidez científica y la originalidad del tema. Los trabajos y opiniones publicados en la revista son de exclusiva responsabilidad de los autores. El idioma oficial de la revista es el español, pero se aceptan trabajos en inglés y en portugués.

El trabajo será enviado en formato electrónico a la dirección email de la revista (reportescientificos@gmail.com), consistiendo en archivos de texto, archivos de planilla electrónica y archivos de imagen. **El archivo principal de texto debe contener únicamente texto, sin ilustraciones ni tablas embebidas**, sino únicamente las respectivas citas a las mismas en el texto (numeradas secuencialmente). **Las tablas e ilustraciones deberán ser remitidos en formato digital en archivos independientes**. Los respectivos archivos deberán indicar en su nombre a qué número de tabla o ilustración corresponden.

El archivo de texto debe ser producido con Microsoft Word® u otro editor de texto perfectamente compatible. El texto deberá estar en letra Times New Roman, tamaño 11. Todo trabajo llevará en su primera página los siguientes elementos: **a) el Título** en español e inglés, **b) la lista de Autores** con nombre y apellido, **c) la Afiliación** laboral de cada autor, **d) un Resumen** de un máximo de 250 palabras en español, **e) un máximo de 7 Palabras clave** en español, **f) un Abstract** en inglés, correspondiente a la versión en español y **g) un máximo de 7 Key words** en inglés, correspondientes a la versión en español. **En caso de trabajos en Portugués** se añaden Título, Resumen y Palabras clave en dicho idioma. El resumen sólo podrá obviarse en el caso de Editoriales, Comunicaciones cortas y Correspondencias presentadas como tales. El cuerpo principal del texto podrá contener, según el contexto del trabajo, las secciones de **1) Introducción, 2) Materiales y métodos (o sólo uno de ellos de acuerdo al caso), 3) Resultados, 4) Discusión, 5) Conclusión, 6) Agradecimientos y 7) Literatura citada**. Tales secciones podrán sufrir fusión o no existir, de acuerdo a la metodología de trabajo o enfoque dados por el autor, así como al tipo de escrito (Artículo original, Comunicación corta, etc.) como haya sido presentado por autor o como lo decida el comité editorial. **Los pies de figuras y tablas** deberán ir al final del texto, a continuación de la sección de literatura citada.

Las citas bibliográficas deberán seguir las normas APA. Según estas normas, el año va entre paréntesis y se destacan el autor y año en las citas en texto: “Según González (1999)” o “El método es reciente (González, 1999)”. Para la lista en la sección de Literatura citada la secuencia lógica y formato es de “Autor. (Año). Título. Publicador, Volumen(Número): Páginas.”, poniéndose siempre primero el apellido de cada autor, seguido de sus correspondientes iniciales y separados por comas, con el último autor separado por un signo de ampersand. Se aplicará cursivas respectivamente en el título si se trata de un libro o tesis, o en el publicador si se trata de un artículo. Se ilustra en los siguientes ejemplos:

González, A.P. (1999). *Métodos de análisis crítico*. Asunción: Editorial Nueva. 120 pp.

González, A.P., Martínez, G.T. & Robledo, H.A. (1999). Análisis de la producción científica del país. *Revista de Filosofía Científica*, 45(2): 56-61.

Las tablas y cuadros deberán presentarse en archivos de Microsoft Excell® u otro programa perfectamente compatible, aunque en muchos casos se aceptan también tablas embebidas en archivo de Microsoft Word®, siempre que sea en archivo separado del de texto. **Las ilustraciones (graficos, imágenes, fotos, dibujos, mapas, esquemas o láminas completas) deberán presentarse cada una en un archivo aparte**, en formato JPG o TIF, generados en Adobe Photoshop u otro programa de procesamiento de imágenes. Deberá cuidarse que posean buen enfoque, claridad y contraste, que tengan una resolución mínima de 300 dpi y máxima de 1000 dpi y teniendo en cuenta que su anchura máxima en la revista será de 16 cm.

El proceso de evaluación incluye una primera revisión por el Comité Editorial para determinar si el artículo corresponde a la línea editorial y si cumple con los criterios generales de publicación. Una vez que el artículo se considere pertinente, se someterá a por lo menos dos revisores especialistas en el tema, de cuya opinión depende la aceptación definitiva del artículo. Si existiera una contradicción en la opinión de ambos especialistas, se someterá al Comité editorial o en caso contrario se solicitará una tercera opinión de un tercer especialista. El dictamen podrá ser aceptado, rechazado o condicionado, que será comunicado por escrito al autor principal en un plazo no mayor de tres meses de la recepción del material original. Si el dictamen es condicionado, el autor deberá remitir la nueva versión impresa y en formato digital en el plazo que se le indique que no podrá exceder de los 30 días posteriores a la recepción de la comunicación.

REPORTES CIENTÍFICOS

DE LA FACEN

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Rep. cient. FACEN	San Lorenzo (Paraguay)	Vol. 7, Nº 2	julio-diciembre de 2016	ISSN 2078-399X (versión impresa) ISSN 2222-145X (versión online)
-------------------	------------------------	--------------	-------------------------	---

ARTÍCULOS ORIGINALES

- 63-75 **María Raquel Martínez.** Análisis multitemporal con imágenes clasificadas de la zona de la cuenca del Lago Ypacaraí.
- 76-86 **Viviana Isabel Díaz Escobar.** Caracterización de la irradiancia eritémica diaria basada en modelos de series temporales y determinación del índice UV en el Departamento Central del Paraguay.
- 87-95 **Narciso Cubas Villalba & Diego Adán López.** Evaluación hidrogeológica del Acuífero Independencia en el area noreste de la ciudad de Caazapá, Paraguay basado en datos de sondeos de exploracion mineral.
- 96-102 **Julissa Armoa.** Estudio de la variabilidad de la concentración de material particulado en una zona de actividad minera de la ciudad de Itá en febrero del año 2015.
- 103-108 **Walter Adrián Thompson Sosa.** Caracterización de un mineral de Paraguay por Resonancia Paramagnética Electrónica.
- 109-113 **Fredy Julián Gómez Grance, Analiz López, Oscar Alberto Velázquez Ortiz & Francisco Cabañas.** Valoración de los parámetros de calidad de filmes radiográficos vencidos y almacenados en un depósito de la Administración Central de Salud.

TÓPICOS ACTUALES

- 114-116 **Walter Thompson.** Observación de ondas gravitacionales generadas por la fusión de un sistema binario de agujeros negros.

