



## VISUALIZACIÓN DE PATRONES GEOQUÍMICOS MEDIANTE REDES NEURONALES ARTIFICIALES: UNA NUEVA PERSPECTIVA DE ANÁLISIS PARA LAS CIENCIAS DE LA TIERRA.

LACASSIE, J. P.<sup>1</sup>, RUIZ DEL SOLAR, J.<sup>2</sup>, ROSER, B.<sup>3</sup>, BELOUSOVA, E.<sup>4</sup>, ORTIZ, E.<sup>5</sup>,  
HERVÉ, F.<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile. E-mail: jlacassi@cec.uchile.cl

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Casilla 412 – 3, Santiago, Chile. E-mail: jruizd@cec.uchile.cl

<sup>3</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan. E-mail: roser@riko.shimane-u.ac.jp

<sup>4</sup>GEMOC ARC National Key Centre, Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, NSW 2109, Australia. E-mail: ebelouso@els.mq.edu.au

<sup>5</sup>Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan.

<sup>6</sup>Departamento de Geología, Universidad de Chile, Casilla 13518, Correo 21, Santiago, Chile. E-mail: fherve@cec.uchile.cl

### 1 INTRODUCCIÓN

Los estudios geoquímicos de elementos mayores y en trazas proveen de claves importantes para el entendimiento de procesos geológicos tanto de escala regional como global. Sin embargo, dado el constante incremento del volumen de información disponible, los geoquímicos se ven enfrentados cada vez con mayor frecuencia al problema de extraer información de bases de datos con un gran número de variables. Una herramienta comúnmente utilizada para atacar este problema es el Análisis de Componentes Principales (ACP). Sin embargo, por tratarse de un método lineal, las relaciones de mayor orden (no-lineales) entre las variables no son tomadas en cuenta. En tal sentido una oportunidad única para el estudio geoquímico multivariado lo proveen las modernas técnicas de análisis a través del uso de Redes Neuronales Artificiales Auto-organizativas (RNAA). De entre las RNAA, la denominada Self Organizing Map (SOM; Kohonen, 1995) es una de las más estudiadas y ha sido aplicada a diversos campos de investigación. Sin embargo, aún no ha sido utilizada extensivamente para el estudio de datos geoquímicos. En este trabajo utilizamos la red Growing Cell Structures (GCS; Fritzke, 1996), una extensión del algoritmo SOM, con el objetivo de encontrar representaciones visuales que simplifiquen el análisis geoquímico multivariado, sin perder la información relevante. El método ha sido probado utilizando análisis geoquímicos de cuatro tipos diferentes de materiales agrupados en cuatro bases de datos distintas (sedimentos fluviales, rocas volcánicas de arco de isla, areniscas y circones ígneos), a fin de visualizar:

1. Las características geoquímicas en sedimentos fluviales obtenidos de la cuenca del río Kando y sus tributarios.
2. Los patrones geoquímicos existentes entre distintas categorías de rocas de series volcánicas de arco de isla.

3. Los patrones geoquímicos existentes entre areniscas pertenecientes a cuatro categorías de primer orden de proveniencia sedimentaria de rocas terrígeno-clásticas.
4. Los patrones geoquímicos existentes entre circones asociados a distintas fuentes ígneas.

La cuenca del río Kando tiene un área efectiva de 430 km<sup>2</sup> y se ubica en la Prefectura de Shimane, en Japón. Su estudio tiene una relevancia especial dada la actual construcción de una represa en el río Kando, en las cercanías de la localidad de Shitsumi.

## 2 METODOLOGÍA PROPUESTA

Para cada base de datos los cálculos fueron realizados utilizando el software GCSVIS, el cual convierte la frecuencia de los casos asociados a una salida final (*outcome*) en una probabilidad posterior asociada a cada nodo de la red neuronal. Las probabilidades de los casos de entrenamiento son entonces desplegadas en un mapa de colores (visualización en 2 dimensiones) o como alturas en un rango de variación entre 0 y 1 (visualización en 3 dimensiones) sobre la estructura final de la GCS. A su vez, los valores promedios de las variables individuales (elementos mayores o en trazas, en este caso) también pueden ser desplegados como mapas de colores sobre la estructura final de la GCS, lo que permite la realización de comparaciones visuales con el mapa de probabilidades posteriores de las salidas finales. Adicionalmente, las cuatro bases de datos han sido analizadas mediante ACP utilizando los datos en forma estandarizada. Los datos han sido proyectados sobre las dos primeras componentes principales generando diagramas binarios en los que la información multivariable ha sido reducida a dos dimensiones.

## 3 DATOS

**Sedimentos fluviales** - La matriz de datos de sedimentos fluviales comprende los análisis geoquímicos de la fracción fina (<180 μm) de 86 muestras de sedimento colectadas en la cuenca del río Kando. Las variables asociadas a cada muestra corresponden a las concentraciones (ppm) de 14 elementos en traza (Ba, Ce, Cr, Ga, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Th, V, Y y Zr). Las muestras pueden ser divididas en cuatro grupos de acuerdo a sus posiciones relativas con respecto a la ubicación de la futura represa y de acuerdo a sus razones Zr/Sc y Th/Sc:

1. Above (43%): Muestras recolectadas en el área de la cuenca ubicada corriente arriba respecto del sitio de construcción de la represa.
2. Upper Main Branch Channel (UMBC) (8%): Muestras recolectadas en el brazo principal del río Kando, en el área ubicada corriente abajo respecto del sitio de construcción de la represa, y que presentan altas razones Zr/Sc y Th/Sc.
3. Lower Main Branch Channel (LMBC) (9%): Muestras recolectadas en el brazo principal del río Kando, en el área ubicada corriente abajo respecto del sitio de construcción de la represa, y que presentan bajas razones Zr/Sc y Th/Sc.
4. Below (40%): Muestras recolectadas en los afluentes secundarios, en el área de la cuenca ubicada corriente abajo respecto del sitio de construcción de la represa.

Las muestras LMBC fueron recolectadas en el extremo inferior del brazo principal del río Kando, entre las localidades de Sada y la desembocadura del río, mientras que las muestras UMBC se recolectaron corriente arriba, entre la localidad de Sada y el sitio de construcción de la represa.

**Rocas volcánicas de arcos de islas** - Las rocas volcánicas analizadas provienen de los arcos volcánicos de Taupo (Nueva Zelanda) y de Lau (Fiji). Estos arcos son del tipo calcoalcalino y de K bajo a intermedio (*low-intermediate K*), respectivamente. Los datos geoquímicos corresponden

a 312 análisis de roca total con información acerca de la concentración de 10 elementos mayores (wt%) de basaltos (32%), andesitas (28%), dacitas (15%) y riolitas (25%) (Cole, 1979; Cole et al., 1985). Las divisiones entre clases, establecidas sobre la base del contenido anhidro de SiO<sub>2</sub> (wt%), corresponden a: basaltos <52, andesitas 52-63, dacitas 63-70 y riolitas 70>. Un 40% de las rocas clasificadas como riolitas (SiO<sub>2</sub>>70%) corresponden a ignimbritas de la zona volcánica de Taupo. De forma de permitir la comparación directa entre estas rocas, todos los análisis fueron recalculados al 100% libre de volátiles.

**Areniscas** - Las areniscas utilizadas para conformar esta base de datos provienen de sucesiones sedimentarias de proveniencia sedimentaria bien establecida, en ningún caso determinada utilizando solamente medios geoquímicos, y con un grado metamórfico inferior a la transición entre las facies esquistos verdes-anfibolita (Lacassie et al., manuscrito enviado). Los datos comprenden las concentraciones (ppm) de 11 elementos en traza (Y, Nb, Rb, Th, Ba, Zr, V, Sc, Ce, Cr y Sr) de 627 areniscas pertenecientes a cada una de las cuatro categorías de proveniencia sedimentaria de primer orden: máfica (P1: 13%), intermedia (P2: 21%), félsica (P3: 43%) y reciclada (P4: 23%), definidas por Roser y Korsch (1988).

**Circones** - Esta base de datos incluye muestras de circones seleccionadas de un amplio rango de rocas ígneas, con una gran variabilidad geográfica (Belousova et al., 2002). Los datos comprenden las concentraciones (ppm) de 7 elementos en traza (Y, Nb, Yb, Lu, Hf, Th y U), determinadas por análisis de microsonda electrónica y LAM-ICPMS, de 455 circones de distintas fuentes ígneas: kimberlitas (76%), carbonatitas (6%), rocas graníticas (6%), larvikitas (8%) y sienitas-nefelínicas pegmatíticas (4%).

#### 4 RESULTADOS

El análisis GCS de cada una de las bases de datos utilizadas dio como resultado 4 redes con distintas topologías o mapas (fila superior de las Figuras 1, 2, 3 y 4). Se observa que, para cada base de datos, el mapa GCS permite la visualización del rol que cumple cada variable de entrada (elemento mayor o en traza) en la separación general de los casos (filas inferiores de las Figuras 1, 2, 3 y 4).

**Sedimentos fluviales** - La red GCS modeló los datos de sedimentos fluviales como cuatro grupos o clusters distintos, los cuales se aprecian en los mapas de color como cuatro áreas diferenciadas de alta probabilidad (Figura 1). La red GCS asoció a cada uno de estos clusters con una localidad de muestreo específica: Grupo 1 (Above), Grupo 2 (UMBC), Grupo 3 (LMBC) y Grupo 4 (Below). En contraste, en el diagrama bivalente resultante del análisis ACP de estos datos, no se aprecia con claridad ningún tipo de agrupamiento (Figura 1). En términos de la concentración de elementos en traza (ppm), el mapa GCS muestra con claridad los contrastes y afinidades existentes entre los cuatro grupos distintos. Las altas concentraciones de los estrechamente correlacionados Ce, Th, Nb, Zr, Rb, Ba e Y, están asociadas con las muestras del Grupo 1, es decir aquellas recolectadas corriente arriba respecto del sitio de la represa. Por otra parte, aquellas muestras recolectadas corriente abajo respecto del sitio de la represa (Grupo 2, Grupo 3 y Grupo 4), presentan las mayores concentraciones de V y de Sc. Tales contrastes son un reflejo de las características petrológicas de las fuentes de los sedimentos. El área de la cuenca ubicada corriente arriba respecto de la represa esta dominada por granitoides y rocas volcánicas félsicas, mientras que el área ubicada bajo corriente esta dominada por mezclas de rocas volcánicas mixtas y por rocas sedimentarias. La transición Grupo1-Grupo 2 está caracterizada por un decrecimiento

gradual en la abundancia de Ce, Th, Nb y de Rb, mientras que la transición Grupo 3-Grupo 4 está relacionada con un incremento gradual de los contenidos de V y de Sc. Tales patrones reflejan la disolución corriente abajo de los componentes detríticos derivados de los granitoides y de las rocas volcánicas félsicas, en materiales más máficos. En una subregión discreta del mapa GCS, en el área asociada al Grupo 1, aparecen valores anómalamente altos de V, Cr y de Ni, los cuales se deben probablemente a altas concentraciones de minerales accesorios. Las fases minerales involucradas más probables incluyen óxidos de Fe-Ti, los cuales formaban la base de la industria del acero de la zona (Fe, Ti, Cr, Ni y V), junto a fragmentos de cubiertas de Fe-Mn (*Fe-Mn coatings*). Las muestras LMBC se caracterizan por presentar altas concentraciones de Sr y de Pb, las cuales reflejan la influencia local de los detritos dacítico-adakíticos, característicamente ricos en Sr, derivados del volcán Mt. Sambe.

**Rocas volcánicas de arcos de islas** - En el caso de las rocas volcánicas la red GCS modeló el problema como cuatro clusters, cada uno asociado con un tipo específico de roca volcánica (basalto, andesita, dacita y riolita; Figura 2). Las transiciones basalto-andesita y dacita-riolita están relativamente bien marcadas, indicando una clara frontera de decisión (Walker et al., 1999). En contraste, la menor definición de la frontera andesita-dacita sería producto de una mayor afinidad geoquímica entre dichas clases. En el diagrama resultante del análisis ACP (Figura 2) también se distinguen clusters asociados a clases específicas de rocas volcánicas. La similitud entre los resultados de los análisis ACP y GCS sugiere la existencia de variaciones lineales en las concentraciones de un número importante de óxidos mayores, durante la transición entre las clases de rocas volcánicas, desde basaltos a riolitas. El análisis del mapa GCS refuerza tal hipótesis ya que revela cambios progresivos durante la transición entre las clases de rocas volcánicas, desde basaltos a riolitas (disminución de CaO y de Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>, e incremento de SiO<sub>2</sub> y de K<sub>2</sub>O). Los óxidos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO y TiO<sub>2</sub> aparecen correlacionados con el Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>, sin embargo, sus distribuciones de concentración son menos homogéneas y presentan cambios bruscos en las transiciones entre clases. Una relación análoga existe para la distribución del Na<sub>2</sub>O respecto de la del K<sub>2</sub>O. Serían entonces las concentraciones de los óxidos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, junto a la del P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, las principales responsables del establecimiento de límites en el mapa GCS entre las cuatro clases de rocas volcánicas (Figura 2).

**Areniscas** - En este caso la red GCS modeló el problema como cuatro clusters delimitados por claras fronteras de decisión, cada uno asociado con un tipo específico de proveniencia sedimentaria (P1 a P4; Figura 3). En contraste, en el diagrama binario resultante del análisis ACP no es posible establecer distinciones claras entre grupos de proveniencia sedimentaria, debido al gran traslape existente entre las respectivas áreas de proyección. Las distribuciones de los elementos en traza en el mapa GCS (filas inferiores de la Figura 3) concuerdan con la sugerencia de Roser y Korsch (1988) de que la geoquímica de las areniscas de primer ciclo (*first-cycle sandstones*) de los grupos P1-P3, reflejan en términos generales el patrón de “diferenciación” entre las composiciones máficas y félsicas promedio. Las asociaciones de elementos distintivas encontradas en P1 (e.g. alto V, Sc y Cu; bajo Ba y Zr) son consistentes con una procedencia máfica. Así mismo, las comparativamente menores concentraciones de V, Sc y de Cu, y los mayores valores de Zr, Nb, Rb y de Th, identificadas en P3, son consistentes con una proveniencia ígnea félsica. Por último, el patrón asociado a P4 de altos valores de Zr, Nb, Rb y de Th, y de bajos valores de Sr, es compatible con los efectos de la meteorización y del reciclamiento, los cuales producen una concentración gradual del cuarzo y de otras fases

minerales resistentes, mientras los feldespatos y los fragmentos líticos lábiles, desaparecen progresivamente.

**Circones** - La red GCS asoció los circones de cada tipo distinto de rocas ígnea con un área específica del mapa GCS. Sin embargo, el área asociada a los circones de carbonatitas, presenta una alta dispersión y se traslapa con el área más definida de circones asociados a kimberlitas. Por esta razón sólo cuatro clusters son distinguibles (Figura 4). Tres de ellos están asociados con circones derivados de tipos específicos de rocas ígneas (rocas graníticas, larvikitas y sienitas-nefelínicas pegmatíticas), mientras que el cuarto cluster está asociado a los circones derivados de kimberlitas y, en un menor grado, a los derivados de carbonatitas. En el diagrama binario resultante del análisis ACP (Figura 4) solamente las áreas asociadas a los circones derivados de carbonatitas y kimberlitas presentan un traslape de consideración. Sin embargo, es difícil el definir una separación clara entre las áreas de proyección de los circones asociados a los distintos tipos de rocas ígneas debido a la gran proximidad y poca definición de los límites entre áreas vecinas. Los resultados concuerdan con lo sugerido por Belousova et al. (2002) respecto de que los circones asociados a rocas graníticas y a sienitas-nefelínicas pegmatíticas presentan las mayores concentraciones de U, Th y Hf, mientras que los contenidos más bajos en estos elementos en trazas son característicos de los circones kimberlíticos. Sin embargo, los circones asociados a las sienitas-nefelínicas pegmatíticas utilizados en este trabajo corresponden a muestras provenientes de Noruega que presentan concentraciones de U anómalamente bajas (Belousova et al., 2002), por lo que solamente el Th muestra una correlación positiva con el Y, el Nb y con las REE (Yb y Lu). Las REE (Yb y Lu) junto con el Y presentan concentraciones altas en los circones derivados de sienitas-nefelínicas pegmatíticas, y concentraciones bajas en los circones derivados de kimberlitas. Sin embargo, las bajas concentraciones de Y y de REE de los circones asociados a rocas graníticas impiden el establecer un patrón claro de enriquecimiento progresivo en tales elementos, desde los circones de origen mantélico hacia los asociados a rocas graníticas y pegmatíticas.

En todos los casos (sedimentos fluviales, rocas volcánicas de arco de isla, areniscas y circones) el entrenamiento no-supervisado de la red GCS implica que los resultados fueron obtenidos sin un modelo previo de los datos, por lo que el agrupamiento o clustering resultante en los mapas GCS corresponde a una característica “natural” de las muestras de las bases de datos utilizadas. El éxito de la red GCS en capturar los patrones geoquímicos de agrupamiento de las bases de datos utilizadas puede ser juzgado al comparar tales resultados con los obtenidos mediante el método de ACP (Figuras 1, 2, 3 y 4). En el caso de las rocas volcánicas se aprecia una notable similitud entre los clusters resultantes de ambos métodos. Sin embargo, para el caso de las bases de datos de sedimentos fluviales, de areniscas y de circones, no fue posible establecer diferencias claras entre grupos o clusters de muestras utilizando el método ACP. La comparación de estos resultados con los obtenidos mediante GCS indica que probablemente los patrones de agrupamiento geoquímico de las bases de datos de los sedimentos fluviales, de las areniscas y de los circones, corresponden a relaciones no-lineales entre los datos, las cuales son imposibles de descubrir utilizando ACP.

#### 4 CONCLUSIONES

Los resultados muestran que las RNAA son apropiadas para identificar patrones geoquímicos en las bases de datos utilizadas. Los mapas GCS proveen de información valiosa para la interpretación de datos geoquímicos, ya que permiten visualizar interrelaciones geoquímicas

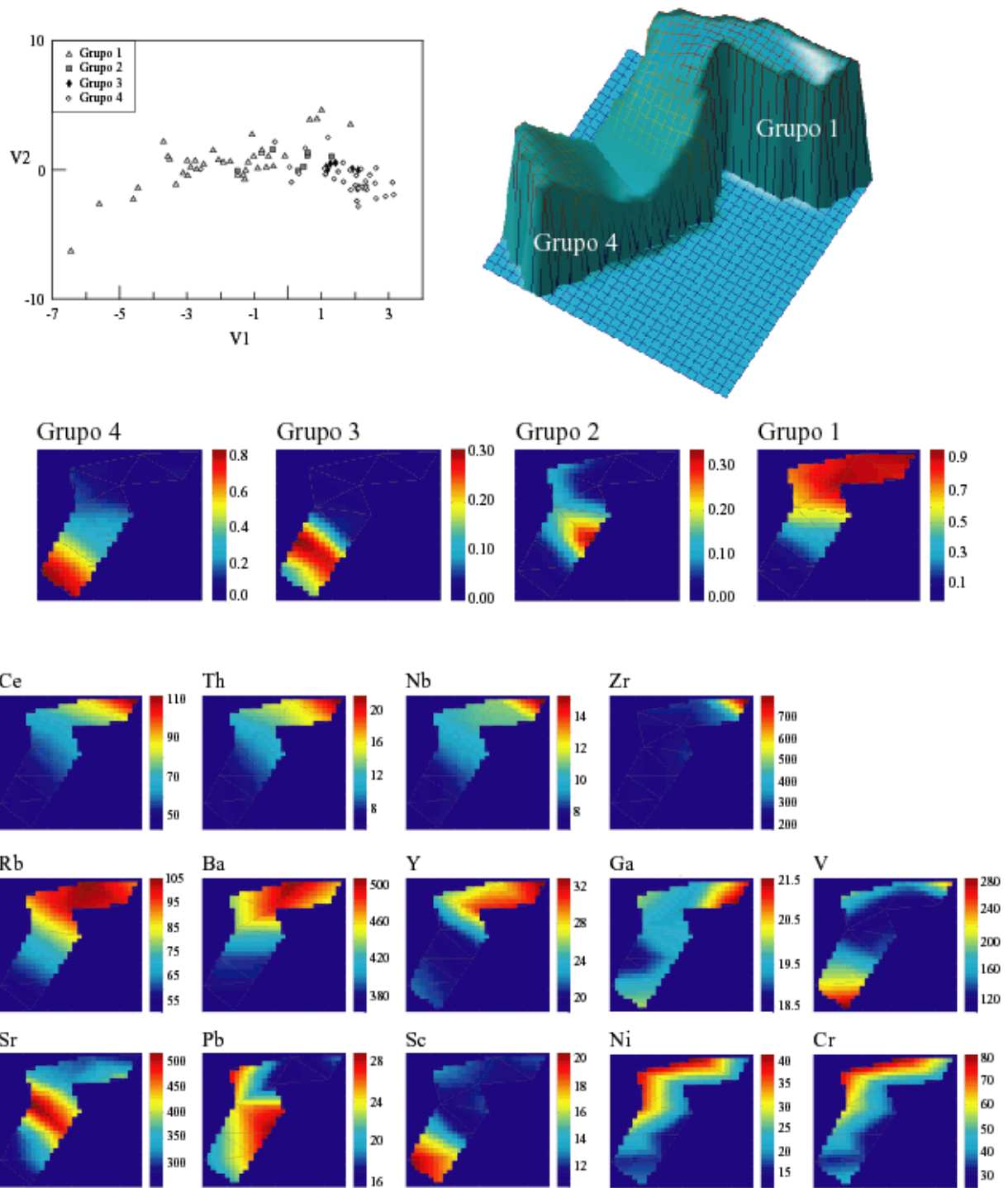
relevantes. La red GCS presenta claras ventajas interpretativas y analíticas respecto de otros métodos de análisis multivariado más convencionales, limitados a las relaciones lineales entre variables, tales como el ACP. Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que las RNAA y en particular la red GCS tienen un considerable potencial de aplicación en las Ciencias de la Tierra.

### **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación fue llevada a cabo gracias al apoyo del Proyecto FONDECYT # 2010010 a cargo de J. P. Lacassie. El software GCSVIS, utilizado para el análisis GCS, fue desarrollado y escrito por Andrew J. Walker, Dr Robert F. Harrison y Dr Simon S. Cross del Department of Automatic Control & Systems Engineering and Pathology at the University of Sheffield, UK.

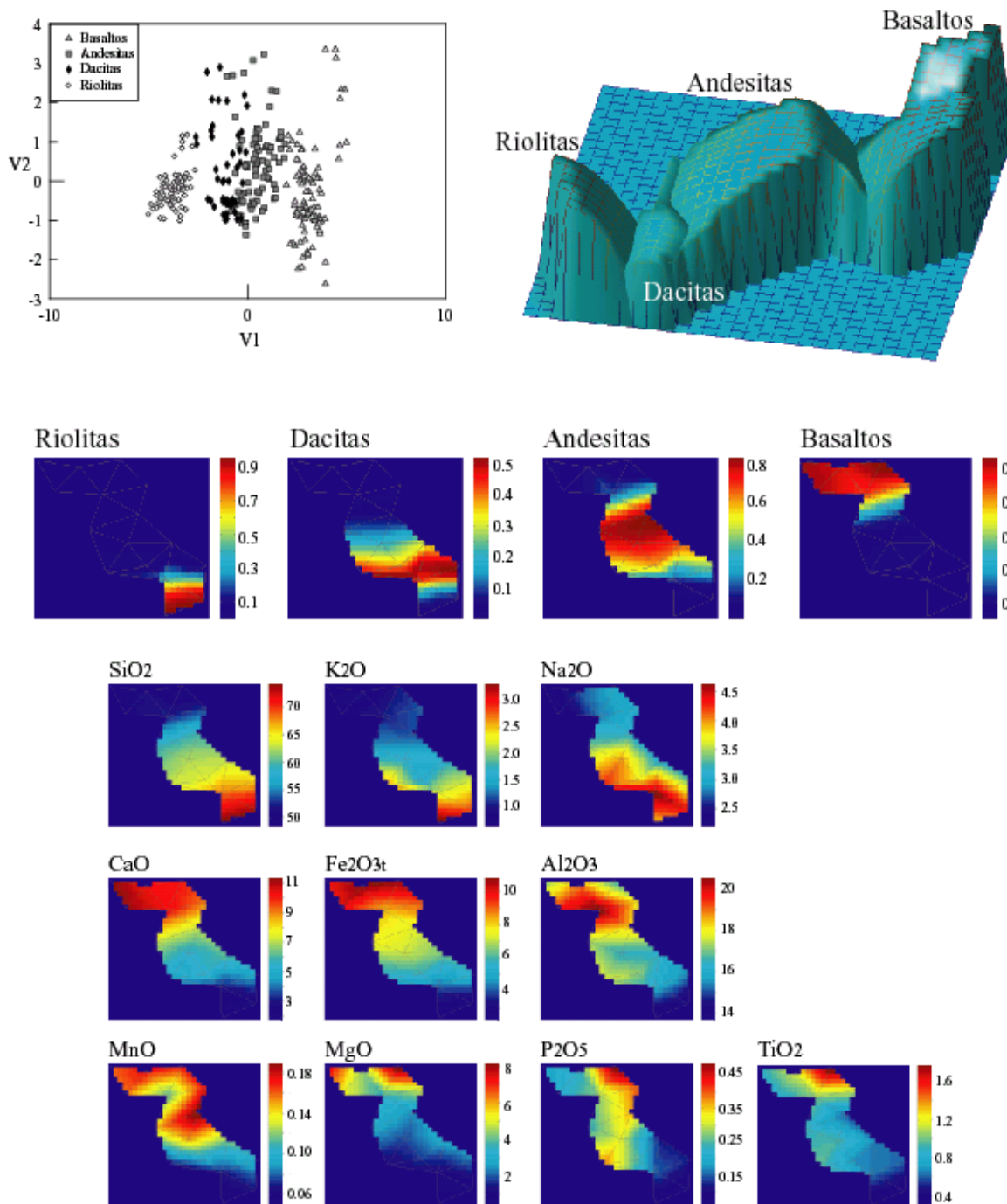
### **REFERENCIAS**

- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. y Fisher, N. 2002. Igneous Zircon: Trace element composition and relationship to host rock type. *Contr. Min. Petrol.*, Vol. 143. p. 602-622.
- Cole, J. W., 1979. Chemical analyses of lavas and ignimbrites of the Taupo Volcanic Zone: Victoria Univ. of Wellington, Wellington, Geol., Dept., Publ., No 13. 31 pp.
- Cole, J. W., Gill, J. W. y Woodhall, W., 1985. Petrologic history of the Lau Ridge, Fiji. In: D. W. Scholl and T. L. Vallier (Editors), *Geology and Offshore Resources of Pacific Island Arcs – Tonga Region*. Circ. –Pac. Council. Energy Miner. Resour., Earth Sci. Ser., Huston, Texas. Circ. –Pac. Council. Energy Miner. Resour., Vol. 2. p. 379-274.
- Fritzke, B., 1996. Growing Self-organising Networks — Why. In: M. Verleysen, (Ed.), *European Symposium on Artificial Neural Networks*, D-Facto Publishers, Brussels. p. 61-72.
- Kohonen, T., 1995. Self-Organising Maps. In: Huang T., Schroeder, M., (Eds.), *Springer Series in Information Sciences*, Vol. 30 : Springer-Verlag, Berlin, Germany. 362 pp.
- Roser, B.P. y Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone - mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data: *Chem. Geol.* Vol. 67. p. 119-139.
- Walker, A.J., Cross, S.S. y Harrison, R.F., 1999. Visualisation of biomedical datasets using growing cell structure networks: a novel diagnostic classification technique. *The Lancet*, Vol. 354. p. 1518-1521.



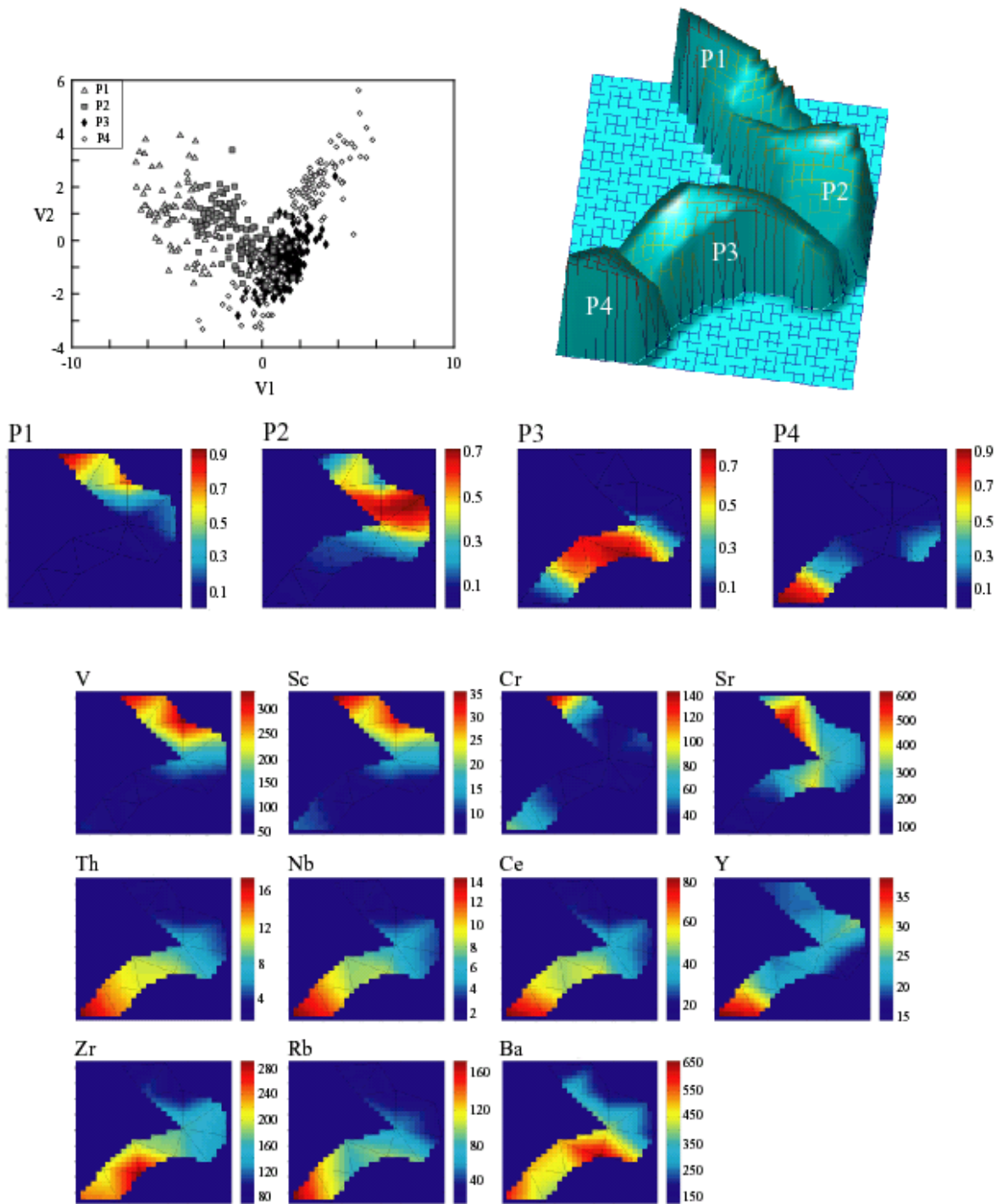
**Figura 1.** Diagrama bidimensional vs. mapa tridimensional, resultantes respectivamente de los análisis ACP y GCS de los sedimentos fluviales del río Kando. La RNAA corresponde a un mapa GCS de 15 nodos entrenado con las 86 muestras de la base de datos. La red GCS modeló el problema como cuatro clusters separados, distinguibles a través de la visualización del mapa GCS bidimensional (segunda fila). La red neuronal asoció cada cluster con una localización de muestreo específica (Grupo 1 a Grupo 4). Para las visualizaciones bi- y tridimensionales del mapa GCS, los valores de probabilidades posteriores están escalados desde 0 (en la base) hasta 1, los cuales se muestran en la visualización bidimensional mediante una escala de colores ubicada a la derecha de cada diagrama. Las tres filas inferiores muestran la distribución de las variables de entrada con las concentraciones escaladas en ppm.



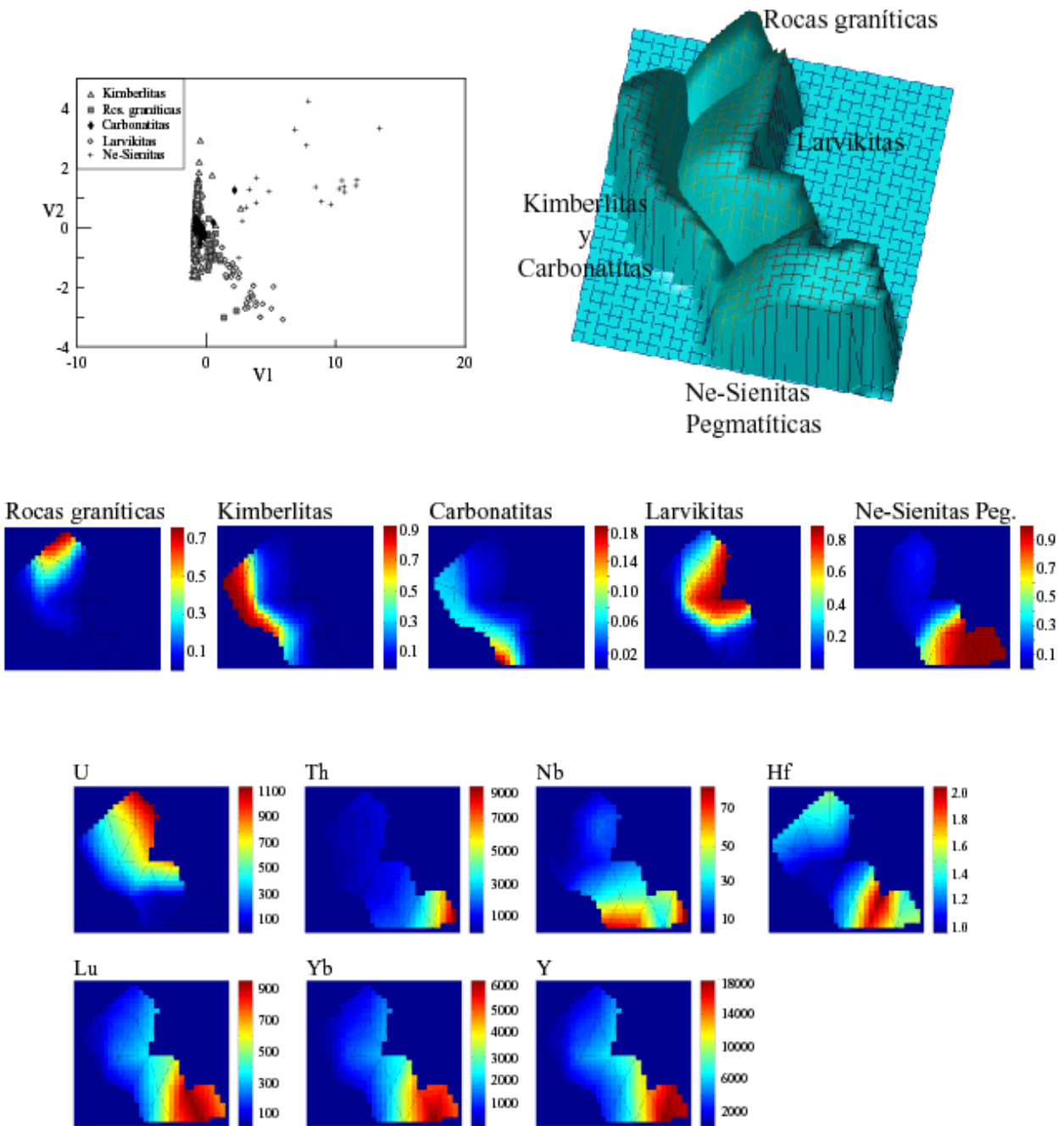


**Figura 2.** Diagrama bidimensional vs. mapa tridimensional, resultantes respectivamente de los análisis ACP y GCS de la base de datos de rocas volcánicas de los arcos de islas Tapuo y Lau. La RNAA corresponde a un mapa GCS de 16 nodos entrenado con las 312 muestras de la base de datos. La red GCS modeló el problema como cuatro clusters separados, distinguibles tanto en el mapa tridimensional como en el mapa bidimensional (segunda fila). La red neuronal asoció cada cluster con una clase de roca volcánica específica (Basaltos a Rioltas). Para las visualizaciones bi- y tridimensionales del mapa GCS, los valores de probabilidades posteriores están escalados desde 0 (en la base) hasta 1, los cuales se muestran en la visualización bidimensional mediante una escala de colores ubicada a la derecha de cada diagrama. Las tres filas inferiores muestran la distribución de las variables de entrada con las concentraciones escaladas en wt %.





**Figura 3.** Diagrama bidimensional vs. mapa tridimensional, resultantes respectivamente de los análisis ACP y GCS de la base de datos de areniscas. La RNAA corresponde a un mapa GCS de 14 nodos entrenado con las 627 muestras de la base de datos. La red GCS modeló el problema como cuatro clusters claramente separados, también distinguibles a través de la visualización del mapa GCS bidimensional (segunda fila). La red neuronal asoció cada cluster con un tipo de proveniencia sedimentaria específica (P1 a P4). Para las visualizaciones bi- y tridimensionales del mapa GCS, los valores de probabilidades posteriores están escalados desde 0 (en la base) hasta 1, los cuales se muestran en la visualización bidimensional mediante una escala de colores ubicada a la derecha de cada diagrama. Las tres filas inferiores muestran la distribución de las variables de entrada con las concentraciones escaladas en ppm.



**Figura 4.** Diagrama bidimensional vs. mapa tridimensional, resultantes respectivamente de los análisis ACP y GCS de la base de datos de circones. La RNAA corresponde a un mapa GCS de 18 nodos entrenado con las 455 muestras de la base de datos. La red GCS modeló el problema como cuatro clusters separados. Tres de ellos están asociados a circones derivados de un tipo específico de roca ígnea (rocas graníticas, larvikitas y sienitas-nefelínicas pegmatíticas), mientras que el cuarto cluster está asociado a circones derivados de kimberlitas y, en menor medida, de carbonatitas, tal como se visualiza en el mapa GCS bidimensional (segunda fila). Para las visualizaciones bi- y tridimensionales del mapa GCS, los valores de probabilidades posteriores están escalados desde 0 (en la base) hasta 1, los cuales se muestran en la visualización bidimensional mediante una escala de colores ubicada a la derecha de cada diagrama. Las tres filas inferiores muestran la distribución de las variables de entrada con las concentraciones escaladas en ppm.