

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Geología y Petróleo



Trabajo Final de Licenciatura

Evaluación de resultados de Sondeos
Eléctricos Verticales en la prospección de
agua subterránea en la provincia de
Neuquén, Argentina

Neuquén, junio 2019

Autor: Facundo Agustín Paganini Gismondi

Director: Prof. Luis Arenas

Co-director: Lic. José R. Gatica

AGRADECIMIENTOS

A la educación pública y gratuita, política necesaria para el desarrollo de nuestro país.

A la Universidad Nacional del Comahue, a la Facultad de Ingeniería y a la Biblioteca Central. A todos los docentes y no docentes que forman profesionales y, sobre todo: personas.

A mis directores, Luis Arenas y José Gatica. Por guiarme en este camino, por su tiempo, paciencia y dedicación.

Al jurado, gracias a sus comentarios y críticas constructivas que mejoraron este trabajo.

A Cecilia Dufilho, por proponerme este trabajo, por brindarme su apoyo en todo momento y ser fuente de consulta permanente.

A Adriana Belloti, Sebastián Boiocchi y Miriam Minutella por compartir su trabajo de manera desinteresada y que gracias a sus datos este trabajo fue posible.

A mis padres, por su amor y esfuerzo al brindarme todo lo que necesité y apoyarme en todo lo que emprendía.

A mi familia y a Marina, por su cariño y por estar a mi lado.

A mis compañeros de estudio, sin ellos el camino recorrido hubiese sido mucho más difícil.

A mis amigos, por estar en las buenas y en las malas.

A la memoria de Ricardo y *Freddy* Paganini

RESUMEN

El 60% del territorio de la provincia de Neuquén se encuentra bajo la influencia de una zona climática árida y semiárida (UNEP, 1997). La cantidad y calidad del agua superficial depende de las escasas precipitaciones, el relieve, la permeabilidad del suelo, la cubierta vegetal y la tasa de evaporación. Esta situación se agrava en los períodos de sequía y a raíz del cambio climático que tiende a que los períodos de sequía sean más frecuentes en estos tipos de climas. Por ello surge la necesidad de proveer a las poblaciones de este recurso mediante fuentes alternativas.

La prospección hidrogeológica se define como la búsqueda de reservorios de agua subterránea con características tales que pueda ser explotada. Los métodos geofísicos describen las formaciones geológicas subterráneas a partir de algún parámetro físico. Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) la realizan a través de la resistividad. El objetivo de este trabajo es determinar la adecuación del SEV para identificar litologías y la presencia de acuíferos aprovechables en las condiciones físicas de la provincia de Neuquén.

Al no hallar una metodología conocida para evaluar los resultados de las perforaciones propuestas mediante SEV, se propone una metodología a partir de técnicas de estadística descriptiva univariada y de análisis estadísticos multivariados.

Se recopilieron más de 100 informes de prospección de aguas subterráneas, que en conjunto suman más de 348 SEV y 44 perforaciones. Se seleccionaron 26 sitios en los que en total se realizaron 100 SEV y 31 perforaciones. Tanto los SEV como las perforaciones fueron descritas a partir de variables cualitativas y cuantitativas y se creó una clasificación de errores observados. Además, se confeccionó una tabla de resistividades para distintos tipos de litologías. Posteriormente se realizó un análisis exploratorio de la información y finalmente se utilizaron las técnicas de análisis multivariado: Análisis de Componentes Principales y Análisis de *Clusters*.

Se concluye que el SEV es una técnica útil en la prospección de aguas subterráneas en la provincia de Neuquén, si se interpretan las mediciones de campo bajo un modelo de subsuelo fiable. De lo contrario, la ambigüedad propia del método, hace que los objetivos buscados en las perforaciones no se encuentren a la profundidad estimada en el SEV o simplemente no existan. Se realizan recomendaciones para mejorar la interpretación del SEV y la descripción del control geológico de las perforaciones.

ABSTRACT

The 60% of the territory of Neuquen province is under the influence of an arid and semiarid region (UNEP, 1997). The quantity and quality of the surface water depends on the lack of rainfall, the relief, the permeability of the soil, the vegetation cover and the rate of evaporation. This situation gets worse in drought times and because of climate change, in which drought is more frequent. Therefore, there is a need to provide the populations with this resource through alternative sources.

Hydrogeological prospection is defined as the search of underground water reservoirs with characteristics that can be exploited. Geophysics methods describes underground geological formations from some physic parameter. The Vertical Electrical Sounding (VES) uses resistivity to do this. The aim of this work is to decide the adequation of VES to identify lithologies and the presence of useful aquifers in Neuquen province physical conditions.

As there is no a proper methodology to evaluate the results of the perforations proposed by VES, univariate descriptive statistics techniques and multivariate statistics analysis are suggested.

More than 100 groundwater surveys inform were compiled, and as a whole add up to 348 VES and 44 drillings. 26 sites were selected in which 100 VES and 31 drillings were made in total. Both VES and perforations were described by quantitative and qualitative variables and a classification of observed errors was created. In addition, a resistivity table was made for different lithologies. Subsequently an exploratory analysis of the information was carried out and finally multivariate analysis techniques were used: Principal Components Analysis (PCA) and Clusters Analysis.

It is concluded that VES is a useful technique in the prospection of groundwater in Neuquen province, if the field measurements are interpreted under a reliable underground model. Otherwise, the ambiguity of the method makes that the objectives prospected in the drilling are not at the estimated depth or simply do not exist. It is suggested to improve the interpretation of VES and the description of geological control of the drillings.

Índice

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivos	2
2.	Antecedentes	4
3.	Marco Teórico	7
3.1.	Prospección Hidrogeológica.....	7
3.2.	Sondeo Eléctrico Vertical	9
3.2.1.	Equipo de campo.....	12
3.2.2.	Mediciones de campo	12
3.2.3.	Problema Directo e Inverso.....	14
3.2.4.	Procesamiento de la curva de registraci3n	15
3.2.5.	Ambigüedades de la interpretaci3n	16
3.2.6.	Interpretaci3n geológica e hidrogeológica	17
3.3.	Análisis de Componentes Principales.....	17
3.3.1.	Variables cualitativas en Análisis de Componentes Principales.....	20
3.3.2.	Representaci3n e Interpretaci3n	21
3.3.3.	Análisis de <i>Clusters</i>	21
3.4.	Sistemas de Informaci3n Geográfica.....	23
4.	Área de Estudio	24
4.1.	Área de Estudio	24
4.1.1.	Clima.....	25
4.1.2.	Suelos	25
4.1.3.	Geología	26
4.1.4.	Hidrogeología	30
5.	Metodología	31
5.1.	Sistema de Informaci3n Geográfica	36

5.2.	Descripción de Sondeos Eléctricos Verticales y Perforaciones	36
5.3.	Análisis exploratorio de datos.....	38
5.3.1.	Estadística descriptiva univariada de Tipos de Errores	38
5.4.	Técnicas de Análisis Multivariado	38
5.4.1.	Análisis de Componente Principales	38
6.	Resultados y Discusión	40
6.1.	Datos seleccionados.....	40
6.2.	Descripción de las variables seleccionadas en los sitios escogidos	41
6.3.	Errores observados en la interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales.....	41
6.4.	<i>Performance</i> de las perforaciones propuestas y realizadas.....	43
6.5.	Valores de resistividades encontrados en los ambientes litoestratigráficos de la provincia de Neuquén.....	43
6.6.	Relaciones entre las variables	44
6.6.1.	Correlaciones entre las variables predichas en el Sondeo Eléctrico Vertical y observadas en las perforaciones	44
6.6.2.	Relaciones de las variables en el análisis multivariado.....	45
6.7.	Caracterización de las perforaciones	46
6.7.1.	Agrupamiento de las perforaciones mediante Análisis de Componentes Principales 47	
6.7.2.	Agrupamiento de perforaciones mediante <i>clusters</i>	48
7.	Conclusiones y recomendaciones	52
8.	Bibliografía	54
ANEXO	57
	Autovalores	58
	Tabla A.....	59
	Descripción automática de la dimensión	60

1. Introducción

El agua es vital para el ser humano y es un recurso natural determinante para el desarrollo socioeconómico. En el año 2010, a través de la Resolución 64/292 la Asamblea General de la Naciones Unidas reconoció el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que el agua potable es necesaria para satisfacer los derechos humanos.

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), el 97% del agua del planeta se encuentra en los océanos. El restante 3% se distribuye de la siguiente manera: el 77% se encuentra en glaciares y casquetes polares, 22% está almacenada de manera subterránea y solamente el 1% es superficial. Fig. 1-1.

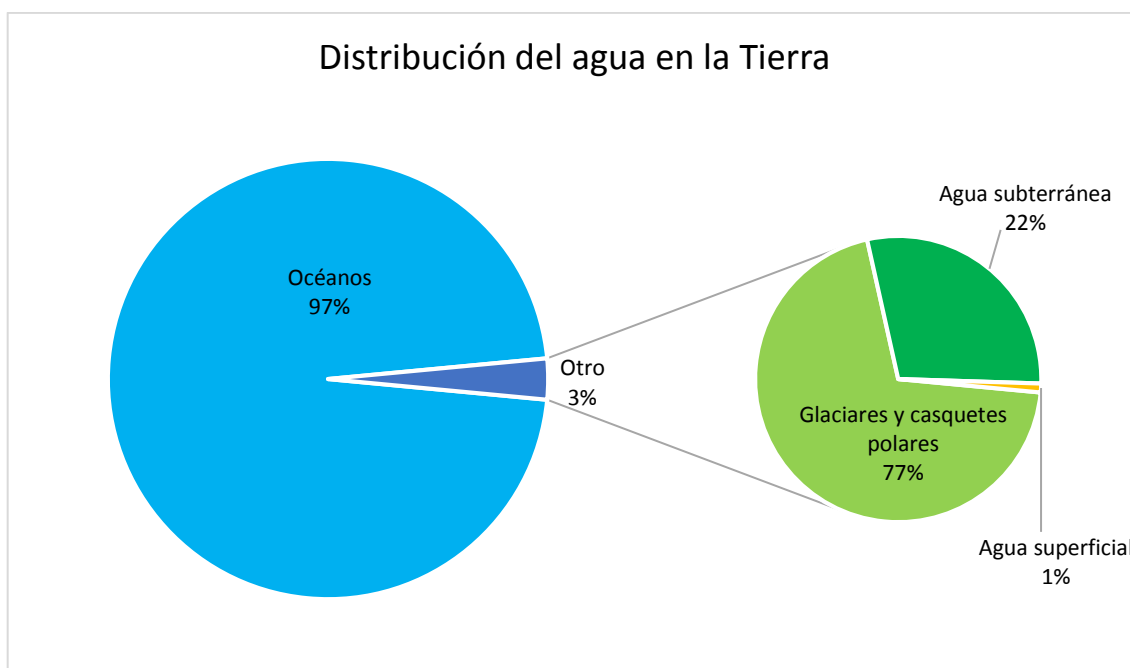


Figura 1-1 Distribución del agua en la Tierra (fuente USGS)

El 60% del territorio de la provincia de Neuquén se encuentra bajo la influencia de una zona climática árida y semiárida (UNEP, 1997). La cantidad y calidad del agua superficial depende de las escasas precipitaciones, el relieve, la permeabilidad del suelo, la cubierta vegetal y la tasa de evaporación. Esta situación se agrava en los períodos de sequía, tiempo en el que el déficit hídrico provoca daños en la vegetación y limita la producción del suelo. El cambio climático tiende a que los períodos de sequía sean más

frecuentes en estos tipos de climas y por ello surge la necesidad de proveer a las poblaciones de este recurso mediante fuentes alternativas

La escasez del recurso se agrava al aumentar su consumo y disminuir la cantidad disponible. En el año 2016 el poder ejecutivo de la provincia de Neuquén, a través del decreto N° 1689-16, declara la Emergencia Hídrica, Ambiental y Agropecuaria Provincial por Sequía, para el ciclo hidrológico 2016-2017 por carencia extraordinaria de lluvias y nevadas en el territorio provincial y entre otras medidas plantea la necesidad de identificar fuentes alternativas de provisión de agua, ya sea total o para suplementar las habituales.

Por ello, surge la necesidad de proveer de agua subterránea a la población, en especial a los asentamientos o puestos rurales que se encuentran alejados de cursos fluviales permanentes.

La prospección hidrogeológica se define como la búsqueda de reservorios de agua subterránea con características tales que pueda ser explotada. Los métodos exploratorios se dividen entre directos e indirectos y dentro de éstos últimos se enmarcan los métodos geofísicos. Los métodos geofísicos describen las formaciones geológicas subterráneas a partir de algún parámetro físico, los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) la realizan a través de la resistividad. El 80% de las prospecciones geofísicas para hidrogeología se hace por métodos eléctricos (Astier, 1968). Dentro de ellos el mayor volumen de trabajo corresponde al SEV (Orellana, 1972), debido a su sencillez y economía. Uno de los resultados más importantes de estas prospecciones es decidir la conveniencia de efectuar o no, pozos o perforaciones y en caso afirmativo, la ubicación y profundidad más favorable para estas captaciones (Orellana, 1972).

A partir del año 1968 se utiliza el SEV como herramienta de exploración de aguas subterráneas en nuestro país (Serres, 1969) y desde entonces se han realizado un sinnúmero de campañas de geoeléctricas para la búsqueda de agua y estudios hidrogeológicos, pero la gran mayoría de estos estudios no se ven reflejados en publicaciones científicas.

1.1. Objetivos

Generales:

Determinar la adecuación del SEV para identificar litologías y la presencia de acuíferos aprovechables en las condiciones físicas de la provincia de Neuquén.

Específicos:

- 1) Identificar la correlación entre el SEV y la litología.
- 2) Identificar la correlación entre el SEV y la presencia de agua subterránea y su calidad.
- 3) Determinar que ambientes geológicos presentan mayor dificultad en la interpretación de SEV.
- 4) Realizar recomendaciones respecto a la utilidad del método SEV en la prospección de agua subterránea en los ambientes hidrogeológicos de la provincia.

2. Antecedentes

La prospección hidrogeológica se define como la búsqueda de reservorios de agua subterránea con características tales que pueda ser explotada. Los métodos exploratorios se dividen entre Directos e Indirectos y dentro de éstos últimos se enmarcan los Métodos Geoelectricos. Estos últimos estudian, a través de mediciones desde la superficie, la distribución en profundidad de magnitudes electromagnéticas, tales como la permeabilidad magnética μ , la permitividad o constante dieléctrica ϵ y la resistividad ρ , siendo esta magnitud la que casi exclusivamente se estudia en la actualidad. Según Astier (1968) el 80% de las prospecciones geofísicas para hidrogeología se hace por métodos eléctricos. Dentro de ellos, el mayor volumen de trabajo corresponde al SEV.

Los orígenes de estos métodos se remiten al siglo XVIII con los trabajos de Gray & Wheeler (1720) sobre la resistividad de las rocas y el descubrimiento realizado por Watson en el año 1746, de la conductividad del suelo. En el siglo XIX, el descubrimiento de la polarización espontánea realizado por Robert Fox, permitió la exploración de yacimientos de minerales no magnéticos. A mediados de 1915, el francés Conrad Schlumberger y el estadounidense Frank Wenner, de manera separada, diseñaron un dispositivo tetraelectrónico que sería la base de todo el progreso venidero. A partir del siglo XX, Schlumberger se dedicó a aplicar el método para la localización y mapeo de trampas petrolíferas. A medida que se encontraban más utilidades al método, surgió la imperiosa necesidad de establecer un sólido sustento teórico en el que se apoyaba la aplicación práctica del método. A raíz de ello, numerosos matemáticos y físicos, agrupados en lo que se conocería posteriormente como la “escuela franco-soviética”, se encargarían de resolver los problemas de propagación de corrientes eléctricas constantes en medios estratificados, isótropos y anisótropos. A partir de la década de 1950, los avances en la computación han permitido a los geofísicos e intérpretes geólogos la resolución de cálculos complejos, la creación de catálogos de curvas patrones, como las de Mooney & Wetzel (1956) y Orellana & Mooney (1966) y el desarrollo de *softwares* dedicados a la interpretación.

Varios autores han tratado la utilidad del SEV en la prospección de agua subterránea pero no se han encontrado publicaciones, tanto nacionales como internacionales, que propongan una evaluación de resultados o metodología para realizarla. Para Alile *et al.* (2008) el SEV es una herramienta confiable para la prospección de aguas subterráneas someras y profundas en ambientes sedimentarios y Arshad *et al.* (2007) concluye que los sondeos geoelectricos son un

método económico para caracterizar aguas subterráneas. En los Países Bajos, el SEV se utiliza para delimitar la cuña salina y conocer la salinidad del agua subterránea en los terrenos ganados al mar. Una sola publicación menciona la precisión del método SEV (Van Dam & Meulenkamp, 1967) en la que establecen que luego de realizar la perforación, el error en la interpretación de la curva de resistividad es menor al 10% en el valor de la profundidad de la interfase subterránea de agua dulce y salada. Este error puede ser mayor o igual al 15% si la información sobre la geología, litología e hidrogeología es insuficiente. Con respecto al error en el contenido de cloruro en el agua subterránea derivado de la interpretación de los valores de resistividad real, puede llegar a alcanzar un 20% dependiendo de la cantidad de información disponible para realizar las curvas de calificación y los mapas de composición del agua subterránea. Es necesario mencionar que para llegar a estas apreciaciones se realizaron 2.000 SEV en una superficie de 13.500 km², aproximadamente 1/6 del área de la provincia de Neuquén.

La primera campaña geoelectrica de nuestro país se realizó en la provincia de San Juan, con el objetivo de evaluar los suministros de agua subterránea en cinco áreas piloto y de entrenar a profesionales argentinos en esta técnica (Serres, 1968). A partir de ese precedente, se han realizado un sinnúmero de campañas geoelectricas para la búsqueda de agua o para estudios de caracterización hidrogeológica. Entre estos trabajos se encuentran el de (Zunino & Ainchil, 2000) que realizaron una evaluación geofísica del Acuífero Guaraní en el que anteponen los métodos geoelectricos de los sísmicos cuando el objetivo de investigación se encuentra por debajo de mantos de basaltos. Trabajos como los de Calvetty Amboni & Bianchi (2016) y Caicedo *et al.* (2016) realizan SEV para la caracterización hidrogeológica apoyados en datos de perforaciones para ajustar los modelos de subsuelo. En la provincia de Neuquén se realizaron estudios hidrogeológicos inéditos para el abastecimiento de agua en distintas localidades y parajes rurales. Se destacan por su importancia los estudios realizados en las ciudades de Zapala (UNS, 2002) y Rincón de los Sauces (Hidroar, 2011).

Los métodos de análisis multivariado son de gran utilidad en estudios en los que a cada individuo estudiado es caracterizado por numerosas variables. Ejemplos de aplicación de estos métodos en el campo de la geología abundan, desde análisis geoquímicos en los que las variables pueden ser la composición en porcentaje o en ppm hasta estudios de corrientes en los que se miden carga de sedimentos suspendidos, sólidos disueltos, pH, profundidad, oxígeno disuelto entre otras. Se puede mencionar como ejemplo de aplicación de las técnicas de análisis multivariado el trabajo de

Mulholland *et al.* (2015) que caracterizan las influencias geológicas y procesos antropogénicos en la calidad del agua subterránea.

3. Marco Teórico

3.1. Prospección Hidrogeológica

La prospección hidrogeológica se define como la búsqueda de reservorios de agua subterránea con características tales que pueda ser explotada. Los métodos exploratorios se dividen entre Directos e Indirectos y dentro de éstos últimos se enmarcan los Métodos Geoelectricos.

La ley en la que se basan los métodos geoelectricos es la Ley de Ohm (Ecuación 3.1) que establece que la Resistencia (R) que ofrece un conductor al flujo de una corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencial (ΔV) entre los extremos del material e inversamente proporcional a la Intensidad (I) del flujo de la corriente.

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

La Resistencia (R) del conductor $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$ Ecuación 3.2) es directamente proporcional a la longitud (L) del material considerado e inversamente proporcional a su sección (A), multiplicada por una constante de proporcionalidad, conocida como *resistividad* ρ

(unidad: Ohm x metro, Ωm) $\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{L}$ Ecuación 3.3). Para terrenos

homogéneos y un arreglo arbitrario de electrodos, la resistividad ρ es calculada a través de la corriente I y la diferencia de potencial U, a través de la Ecuación 3.4):

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$\rho = K \cdot \frac{U}{I} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

K es conocido como el factor geométrico (unidad: *metro*) y se calcula desde el espaciamiento de los electrodos (Ernstson & Kirsch, 2009).

Las condiciones de medios homogéneos e isotropos no suceden en la naturaleza. Por lo tanto, si los datos obtenidos a través de mediciones en medios heterogéneos son aplicados a la (Ecuación 3.4), que aplica a condiciones de entorno homogéneas, el valor de resistividad obtenida

correspondería a una resistividad aparente ρ_A . Esta resistividad no se la puede considerar como promedio ni como media ponderada de las distintas capas litológicas que conforman el subsuelo, ya que puede ocurrir que sea mayor o menor que todas ellas. La resistividad aparente es la variable en la que se expresan los resultados de las mediciones en la mayoría de los métodos geoelectricos y la que se toma como base en la interpretación. (Orellana, 1972).

La resistividad de las rocas es de especial interés en hidrogeología ya que permite, por ejemplo, diferenciar entre rocas saturadas con agua dulce y agua salada, entre acuíferos de rocas blandas arenosas y material arcilloso, entre acuíferos formados por rocas duras porosas/fracturadas y arcillas y margas de baja permeabilidad.

Como la resistividad en la mayoría de los minerales es alta (a excepción de los filosilicatos, grafito y menas metálicas) la corriente eléctrica solo fluye a través de los electrolitos alojados en los poros de las rocas. La resistividad de una roca sin contenido de arcillas y saturada con agua, va a estar dada por la Ley de Archie:

$$\rho_{ACUIFERO} = \rho_{AGUA} \cdot F \quad \text{Ecuación 3.5}$$

$\rho_{ACUIFERO}$ = resistividad específica de una arena saturada en agua

ρ_{AGUA} = resistividad específica del agua de los poros

Para rocas parcialmente saturadas, F puede reemplazarse por F/S_w^2 (S_w es el grado de saturación)

El factor de formación F combina todas las propiedades del material que influyen en el paso de la corriente eléctrica, como la porosidad, la forma del poro y la cementación diagenética. Al depender de la geometría del poro, el factor de formación F está relacionado con la tortuosidad. Esta última describe cuan sinuoso es el flujo de un fluido a través del espacio poral. La tortuosidad depende de la porosidad, la forma del poro y la geometría de los canales porales. Asumiendo que la corriente eléctrica corre por los mismos caminos que recorrerían los fluidos, la relación entre el factor de formación y la tortuosidad está dada por:

$$F = T \cdot \phi^{-m^*}$$

T = tortuosidad

ϕ = porosidad

-m*= exponente de porosidad modificado y es influenciado por la geometría poral, compactación, composición mineralógica y cementación.

3.2. Sondeo Eléctrico Vertical

Básicamente el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) consiste en medir desde la superficie, la resistividad aparente por medio de la inyección de corriente y las diferencias de potencial en puntos situados sobre una recta, que se alejan del centro O del dispositivo, en forma progresiva y regular, a intervalos de escala logarítmica. Para ello se requieren de 2 pares de electrodos: los electrodos A y B que se utilizan en la inyección de corriente y los electrodos M y N utilizados para medir las diferencias de potencial, Figura 3-1.

Por lo general, los electrodos se disponen de manera lineal, siendo las configuraciones más comunes: Schlumberger, Wenner y Dipolo - Dipolo (Zohdy *et al.*, 1974). Figura 3-2. Por su practicidad en el campo, la configuración más utilizada es la Schlumberger, en la cual los electrodos M y N se encuentran en el centro del dispositivo y separados por una corta distancia entre sí y los electrodos de corriente A y B se disponen en los extremos del dispositivo. Se tiene que cumplir que la distancia AB tiene que ser mayor o igual que 5MN. El factor geométrico está dado por:

$$K_{SCH} = \frac{\pi}{MN} \cdot \left(\frac{AB}{2}\right)^2 \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Cuando por condiciones topográficas o por la presencia de obstáculos no se puede desplegar todo el dispositivo Schlumberger, se utiliza el arreglo Medio Schlumberger. En esta configuración solo se despliega un ala. Teóricamente el electrodo de corriente B se ubica en el infinito sin contribuir en los electrodos de potencial. El factor geométrico es:

$$K_{Medio-Sch} = \frac{2\pi}{MN} \cdot \left(\frac{AO}{2}\right)^2 \quad \text{Ecuación 3.7}$$

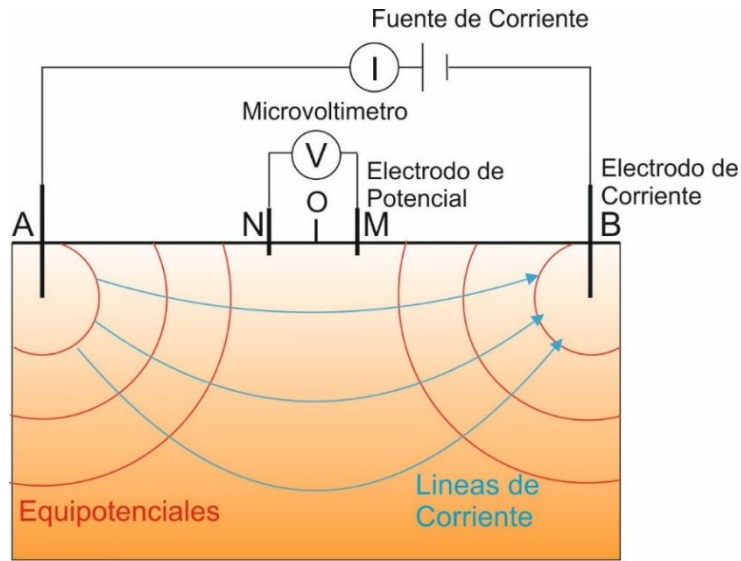


Figura 3-1 sondeo eléctrico vertical

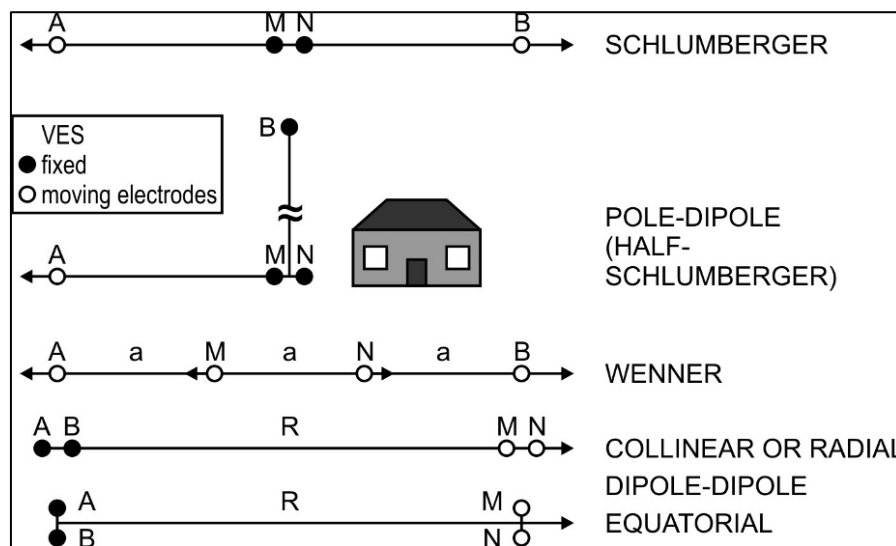


Figura 3-2 Configuraciones de Sondeos Eléctricos Verticales. En negro Electrodo Fijos, en blanco electrodo móviles. Extraído de (Ernstson & Kirsch, 2006)

Este tipo de sondeos es aplicado en terrenos con capas horizontales o cuasi horizontales, por ejemplo: rocas sedimentarias de distintas litologías o acuíferos estratificados. El resultado esperado de este tipo de sondeo es el número de capas del subsuelo, sus espesores y resistividades. Información utilizada para elaborar el modelo geológico del área de estudio.

A medida que los pares de electrodos se van distanciando, también aumenta la profundidad de investigación y las resistividades aparentes son representativas de espesores cada vez mayores de

rocas por las que la corriente circula. Los SEV se pueden clasificar según la distancia final que separa a los electrodos A y B (Tabla 3-1)

TIPO DE SEV	LONGITUD	APLICACIÓN
Corto	AB < 250m.	Geotecnia y Arqueología
Normal	250 m. < AB < 2500 m.	Hidrogeología
Largo	2500 m.< AB < 25000 m.	Prospección petrolera
Muy Largo	Hasta 1200 Km	Investigación geofísica

Tabla 3-1 Clasificación de SEV - Dispositivo Schlumberger

Cada par de medidas de *resistividades aparentes/distancia* es ploteado en un gráfico con escala bilogarítmica e interpolado en una curva continua. Esta curva es la base para conocer la profundidad y resistividad del subsuelo. Figura 3-3.

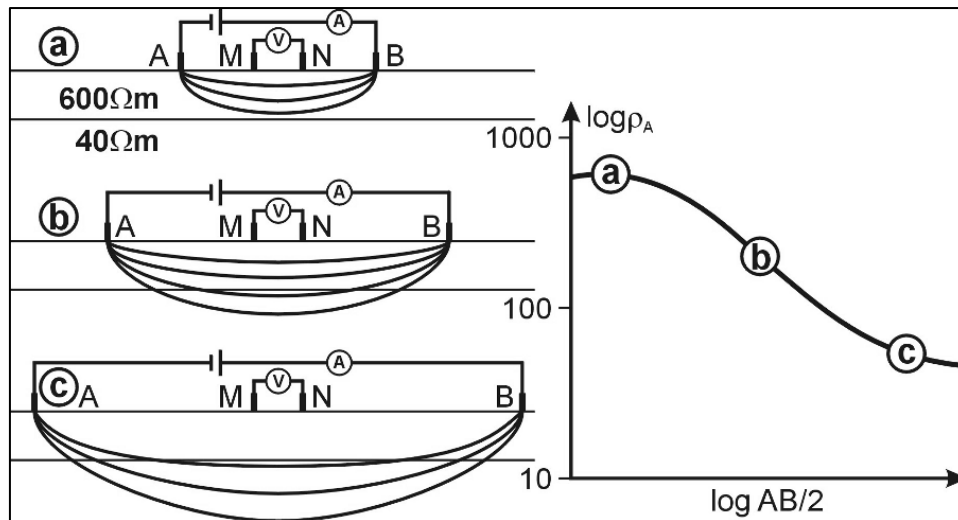


Figura 3-3 Mediciones de resistividad aparente. A mayor distanciamiento de los electrodos de corriente, mayor la profundidad del estudio. A la derecha la curva del sondeo. Extraído de (Ernst & Kirsch, 2006)

Se ha encontrado una disparidad de criterios con respecto a la profundidad de investigación alcanzada en un sondeo. Autores como Ernst & Kirsch (2006), establecen que la profundidad de investigación en dispositivos Schlumberger equivale a la Ecuación 3.8.

$$AB \sim 5 * PI(\text{Profundidad de Investigación})$$

Ecuación 3.8

En cambio, según Orellana (1972) la penetración del sondeo depende de diversos factores y no se puede conocer “*a priori*”. Categoriza como antigua la suposición de que la profundidad alcanzada equivale a una fracción fija de la distancia entre los electrodos de corriente ya que estos planteos no tienen un sustento teórico. También suele ocurrir que la profundidad del sondeo no aumenta a pesar del incremento de la distancia AB. Este suceso ocurre cuando existe en el subsuelo una capa completamente conductora o perfectamente aislante, ya que la corriente eléctrica no puede atravesar dicha capa. En la práctica sucede en formaciones con capas de anhidrita, material muy resistivo.

3.2.1. Equipo de campo

Para llevar a cabo la registración en el campo se tiene que contar con equipamiento específico que soporte las condiciones de trabajo al aire libre. El equipamiento está compuesto por un circuito de emisión y uno de recepción. El circuito de emisión consta de una fuente de energía eléctrica (batería), un amperímetro para medir la intensidad de la corriente, puntos de emisión (A y B) consistentes en clavos metálicos de 0,25 a 0,5 m. de largo y 20 mm. de diámetro y cables de transmisión. El circuito de recepción está compuesto por un milivoltímetro electrónico de alta impedancia y dos electrodos (M y N) para la medición del potencial conectados por cables de medición del circuito. Es importante que los cables estén bien aislados y con una buena cubierta para prevenir pérdidas y que resista las características del terreno y la vegetación.

3.2.2. Mediciones de campo

La aplicación del SEV en la prospección de aguas subterráneas es, quizás, la utilidad en la que más provecho se puede obtener de esta herramienta.

Es importante aclarar que, al momento de plantear la solución al problema propuesto, no basta con indicar la presencia de agua subterránea y que pueda ser explotada por medio de un pozo. Se tiene que indicar de manera precisa cuál es el objetivo que se tiene que alcanzar en la etapa de perforación. Por ejemplo: una intercalación de lentes de areniscas en una formación compuesta por arcilitas o el sustrato impermeable ubicado debajo de areniscas.

Para la realización de un SEV que nos permita resolver un problema hidrogeológico es necesario tener un buen conocimiento de la geología y la hidrología de la zona a estudiar.

Es de suma importancia realizar un relevamiento previo del área de interés y sus áreas vecinas. El primer paso es realizar una recopilación de datos, tanto geológicos como hidrogeológicos. Se

tienen que analizar estudios hidrogeológicos previos, informes de calidad de agua y legajos de pozos. Posteriormente, se tiene que recorrer el área en busca de manaderos y afloramientos. El conocimiento de la columna litológica, sus espesores y la presencia de agua es fundamental para disminuir la incertidumbre de este método de prospección. Como más adelante aclararemos, este método puede arrojar modelos geológicos ambiguos si solamente tomamos la información obtenida por los SEV.

Para la disposición del dispositivo se tiene que tener en cuenta la topografía y para disminuir los efectos de ésta, se tiene que escoger una dirección en la que el arreglo de los electrodos se ubique lo más horizontal posible. En terrenos con mucha pendiente o muy accidentados es preferible optar por un dispositivo Medio Schlumberger (arreglo polo – dipolo). Si se conoce la presencia de capas buzantes en el subsuelo es aconsejable disponer los electrodos en la misma dirección de buzamiento para atenuar efectos perturbadores.

Además de seleccionar una locación con topografía lo más plana posible se debe tratar que exista una extensión lateral suficiente, alejado de cualquier obstáculo (cañadones, bardas, cañerías, cables y demás obras civiles) que puedan modificar la uniformidad del campo eléctrico.

Una vez instalado el equipamiento se procede a medir el potencial natural y se lo energiza con una corriente de intensidad I en mA y se lee la diferencia de ΔV en mV. Los valores se anotan en una tabla y se calcula la resistividad aparente.

El incremento de distancia $AB/2$ sigue una escala logarítmica y a medida que vamos alejando los electrodos A – B la caída de potencial medida en los electrodos MN se vuelve cada vez más débil. Para compensar esta disminución de la caída de potencial se realiza un empalme, que consiste en incrementar la distancia que separa a los electrodos MN para aumentar los valores de diferencia de potencial registrados. En la curva de registraci3n se evidencian los empalmes por la discontinuidad de la curva y por los saltos ocurridos en la misma distancia AB pero de distintas aperturas MN.

Las curvas de registraci3n generalmente son curvas suaves, por lo tanto, si el operador detecta escalonamientos abruptos o cambios claros a lo largo de la curva, es porque se puede estar ante fuertes desviaciones de las capas, ductos, líneas de electricidad o existe una falla en el instrumental. Las discordancias, como las fallas o fracturas, también pueden ser responsable de estas anomalías en la registraci3n, pero también esto sirve en el momento de generar el modelo geológico del subsuelo.

3.2.3. Problema Directo e Inverso

La Geofísica se puede definir como la ciencia y arte que, a partir de fenómenos físicos, naturales o provocados, intenta conocer la estructura, composición y propiedades del subsuelo. La Resistividad es una propiedad física y caracteriza a los materiales que componen el mismo y para conocer su distribución, podemos proceder de dos maneras distintas pero vinculadas entre sí.

A partir de un modelo del subsuelo y en base a sus relaciones físicas podemos calcular de manera teórica como será su respuesta a determinado estímulo. Este método de resolución se denomina “problema directo”. Figura 3-4.



Figura 3-4

En cambio, si a partir de las respuestas obtenidas a través de mediciones, se quiere conocer las propiedades físicas encargadas de generar dichas respuestas y con ello elaborar el modelo del subsuelo, esto se conoce como “problema inverso”. Figura 3-5.



Figura 3-5

La resolución al problema inverso no es única, existen varias distribuciones de propiedades físicas que pueden generar la misma respuesta.

La resolución de este planteo está ligada al “problema directo”, ya que para conocer las propiedades de un medio se proponen modelos y buscamos que respondan de manera semejante a las mediciones. Esta similitud de respuestas da idea de la equivalencia entre el modelo de subsuelo y el subsuelo real.

Como los modelos propuestos dependen de la propiedad física que se está midiendo y se proponen en base a nuestro conocimiento físico del medio, podemos evaluar cuan bien representado está el subsuelo en nuestro modelo (Perdomo, 2009). Si las mediciones obtenidas en el campo no se ajustan correctamente a las respuestas esperadas por el modelo propuesto, entonces se tiene que cambiar los parámetros del modelo para que la respuesta dada en base a las

leyes físicas sea semejante a las mediciones de campo. Si el ajuste entre la respuesta y las mediciones de campo es bueno, entonces el modelo es semejante al subsuelo. Figura 3-6.

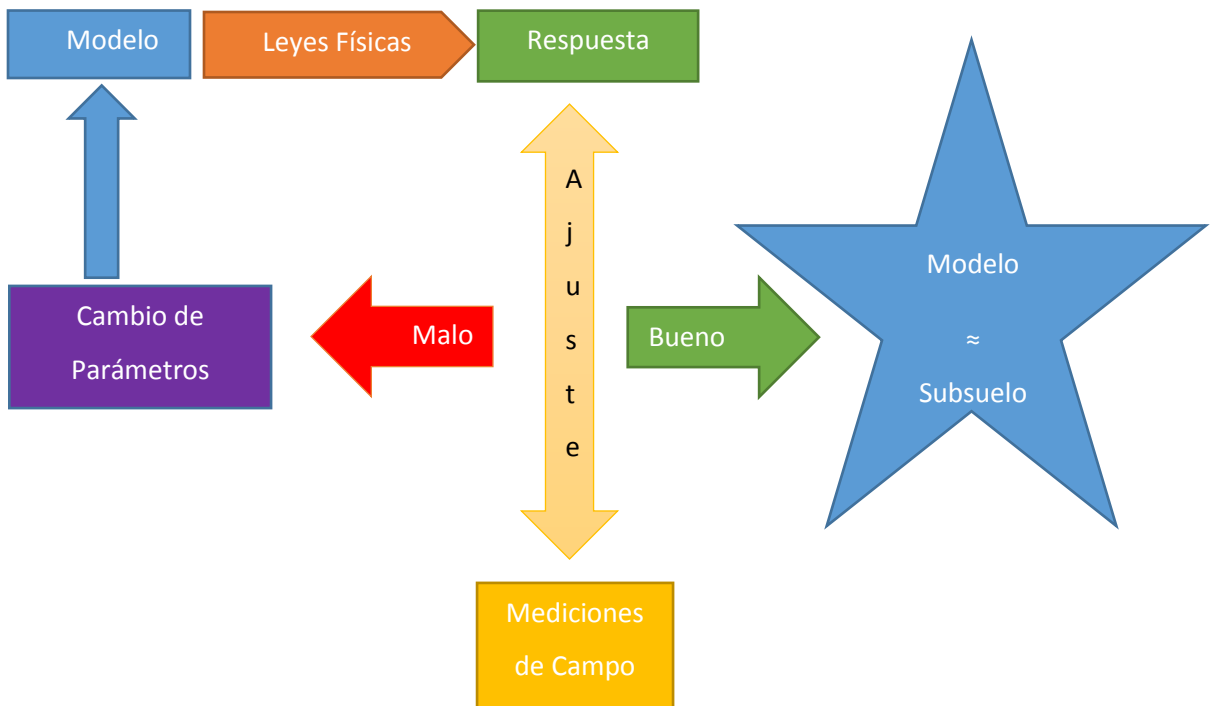


Figura 3-6 Modificada de Perdomo (2009)

3.2.4. Procesamiento de la curva de registraci3n

El resultado final de una campaa de SEV es conocer la estructura del subsuelo en el aa de estudio. Para obtener ese resultado se divide el trabajo en dos etapas. En la primera se busca obtener la distribuci3n de la resistividad en el subsuelo, y en la segunda la significancia geol3gica de esas resistividades, con lo que se pasa de una secci3n geoelectrica a un corte geol3gico (Orellana, 1972).

Para interpretar la curva obtenida en el campo y poder conocer la cantidad de capas, sus espesores y resistividades se sigue un proceso inverso al realizado para obtener la curva de registraci3n. La inversi3n comienza con la comparaci3n con la curva registrada en el sondeo con las curvas calculadas para un modelo de geologaa de subsuelo dado.

En un principio est3 comparaci3n se realizaba a mano, pero con los avances tecnol3gicos se impusieron *softwares* que permiten una r3pida interpretaci3n independientemente del n3mero de capas registradas.

Algunos programas de computación analizan el problema de manera inversa, es decir, a partir de la interpretación manual de la curva de registración y obtenidos los valores de resistividad y espesores, se cargan estos datos y el programa calcula y dibuja la curva de resistividad aparente. Si la interpretación es la correcta, la curva de campo y la obtenida por el programa deben ser iguales. Otros programas resuelven directamente el problema, cargando la información obtenida en el campo y el número de capas y espesores tentativos. El ajuste de los modelos se realiza mediante sucesiones iterativas hasta lograr una superposición aceptable.

Es de suma importancia que el intérprete conozca que la solución obtenida es una de las tantas soluciones posibles que son físicamente equivalentes y que se tiene que considerar todas las equivalencias que respondan a la geología de la zona. Esta ambigüedad generada por las equivalencias físicas es un principio básico de la Geofísica, especialmente en los SEV. Esto hace pensar que la solución también puede ser un problema, que se minimiza con el conocimiento previo del área.

3.2.5. Ambigüedades de la interpretación

Como se expresó anteriormente la interpretación de la curva y el posterior modelado están fuertemente relacionados con el principio de equivalencia. Este principio establece que la curva de registración puede relacionarse con varios modelos físicos equivalentes y que pueden diferir sustancialmente entre ellos.

Se puede decir que un horizonte va a ser discriminado en una curva de registración si su espesor es similar a la profundidad en la que se depositó. La disminución de la resolución vertical a medida que se profundiza el estudio es una clara desventaja del SEV como así también la macroanisotropía.

La anisotropía eléctrica describe el efecto en que la resistividad de las rocas va a ser menor si se mide de manera paralela a los horizontes y a los planos de esquistosidad. De este modo, se define una resistividad longitudinal (ρ_L) y una resistividad transversal (ρ_T). Como las líneas de corrientes son curvas, las resistividades longitudinal y transversal se encuentran. Teóricamente el modelado de una capa geoelectricamente anisótropa de un espesor h , tiene una resistividad substituta ρ_i^* (Ecuación 3.9) y un espesor substituto h_i^* .

$$\rho_i^* = \sqrt{\rho_L \cdot \rho_T} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$h_i^* = h_i \cdot \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_T}} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

La anisotropía geoelectrica es una cuestión de escala y de la resolución vertical de la sección de resistividad. Mientras el grafito, la pizarra o sedimentos lacustres pueden ser definidos microanisotropicamente, una secuencia de capas con comportamiento geoelectrico isotropo puede tener comportamiento macroanisotropo si no están bien definidas en la curva de sondeo.

3.2.6. Interpretación geológica e hidrogeológica

Las posibilidades de utilización de los SEV como herramienta de prospección hidrogeológica dependen de las propias limitaciones del método, relacionadas al contexto geológico y topográfico del área de estudio, así como también por las características eléctricas de las capas existentes. La existencia de capas de muy alta resistividad próximas a la superficie dificulta la transmisión de corriente en niveles subyacentes. Es de suma importancia realizar un relevamiento de la geología de la zona de estudio, sobre todo para comprobar la continuidad de los horizontes y la presencia de discontinuidades tales como fallas o fracturas.

Para corregir problemas originados por la equivalencia, la reinterpretación de los sondeos como así también la realización de nuevas mediciones son necesarias para salvar estos inconvenientes.

En rocas sedimentarias duras en las que se conoce sus espesores y sus resistividades son conocidas y continuas a lo largo de una gran superficie, la interpretación y modelado del SEV es más sencilla. En cambio, en depósitos modernos no consolidados y/o con cambios abruptos de espesores puede llegar a ser necesario la perforación de pozos para ajustar el modelo (Ernst & Kirsch, 2006).

El resultado final de este método, es un modelo de resistividades que se ajuste a la geología e hidrogeología del área y que no tenga discrepancias con la información obtenida de pozos u otro método geofísico de prospección.

3.3. Análisis de Componentes Principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es uno de los métodos estadísticos más utilizados para realizar un análisis exploratorio multivariado cuando en el fenómeno bajo estudio intervienen muchas variables cuantitativas.

El objetivo del ACP es reducir la dimensionalidad del problema, y para ello, se obtienen unas nuevas variables denominadas componentes principales. Las componentes principales son una combinación lineal de las variables originales de manera tal que resultan ortogonales entre sí. La idea es reemplazar a las variables originales por unas pocas componentes principales que retengan

tanto como sea posible la variabilidad del conjunto de datos, reduciendo de este modo la dimensionalidad del problema. El proceso requiere que cada una de las componentes principales contenga, sucesivamente, la mayor cantidad de la variancia posible. Cuando las m componentes principales son obtenidas, también se contabiliza la variancia total original (Davis, 2002).

En la tabla de datos cada fila representa a un individuo, y el número de ellos es denotado como I . Las columnas representan las variables cuantitativas y su número es representado por K . El cruce de una fila i con una columna k se denota como x_{ik} y representa el valor que registró el individuo i para la variable k . Figura 3-7.

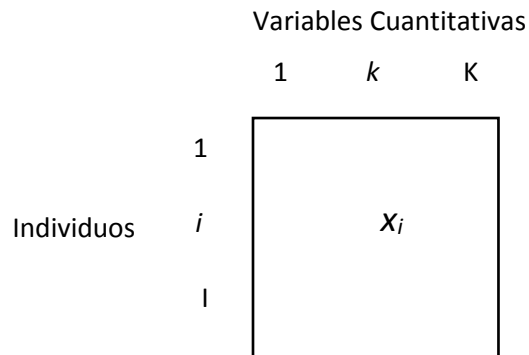


Figura 3-7 Estructura y notación de datos

Los individuos y las variables son de naturaleza diferente: los individuos conforman una nube de puntos en el espacio multidimensional definido por las variables R^K , mientras que las variables conforman una nube puntos en el espacio multidimensional definido por los individuos R^I .

El centrado de la tabla se indica de la siguiente manera:

$$x_{ik} \leftarrow x_{ik} - \bar{x}_{k.}$$

Dentro del espacio de individuos R^K , el centrado se interpreta geoméricamente como el posicionamiento del origen de los ejes en el punto medio G_i , siendo G_i el centroide¹ de la nube de individuos (Figura 3-8). El centrado presenta ventajas técnicas y siempre se realiza en el ACP (Husson *et al.*, 2013). El centrado equivale a efectuar el ACP sobre la matriz de *variancias-covariancias* de las variables originales.

¹ El centroide es el punto del espacio R^k cuyos elementos son las medias de cada variable $G_i = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_K)$

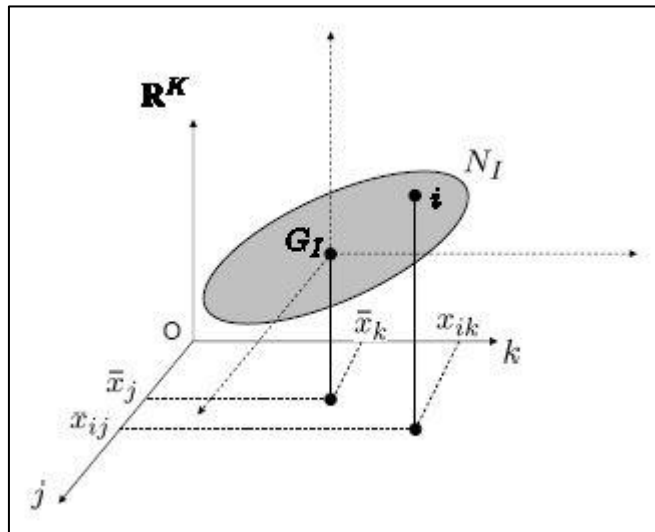


Figura 3-8 Nube de individuos centrada. Extraída de Husson, 2013

Cuando las variables son expresadas en unidades de medida diferentes, se tiene que realizar la operación de reducción (o también conocida como estandarización). Esta operación considera a $(x_{ik} - \bar{x}_k)/s_k$ en lugar de x_{ik} y geoméricamente consiste en elegir la desviación-estándar s_k como unidad de medida en la dirección k . La reducción o estandarización equivale a efectuar el ACP sobre la matriz de *correlación* de las variables originales. Las representaciones de individuos y variables obtenidos por el ACP efectuado sobre matriz de covariancias no son concordantes con los resultados obtenidos por el ACP efectuado sobre matriz de correlación.

Las componentes principales se obtienen mediante la diagonalización² de la matriz de correlación (variables estandarizadas) o la diagonalización de la matriz de covariancias (variables centradas) (Husson *et al.*, 2013).

El ACP corresponde a un cambio de base que permite pasar de las variables originales a sus combinaciones lineales (las componentes principales) tales que la inercia de la nube de puntos proyectada sea máxima. Así, la matriz de coeficientes de la combinación lineal de las variables originales corresponde a la matriz de paso de la antigua a la nueva base. Esta matriz corresponde a las coordenadas de los vectores propios que provienen de la diagonalización de la matriz de *variancias-covariancias* o de *correlación*. Ecuación 3.11.

² Se denomina *diagonalización matricial* al procedimiento de obtener todos los autovalores y todos los autovectores de una matriz.

$$F_S(i) = \sum_{k=1}^K L_S(k) \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{S_k} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

con $L_S(k)$ el coeficiente de combinación lineal de la variable k sobre el eje de rango s .

El ACP describe relaciones lineales entre variables, por ello es pertinente antes de aplicarlo, verificar que no existan relaciones no lineales entre las variables. La verificación visual se puede realizar mediante una gráfica denominada “matriz de dispersión”, en la que se representan los diagramas de dispersión de cada una de las variables originales cruzada con todas las otras variables que intervienen en el análisis.

3.3.1. Variables cualitativas en Análisis de Componentes Principales

Las variables cualitativas³ no pueden utilizarse en el ACP, pero pueden ser incluidas en el análisis como variables suplementarias. Un elemento ya sea un individuo o una variable se denomina “suplementario” si no participó en la obtención de las componentes principales, caso contrario se denominan “activos”. En el plano factorial se puede representar el centro de gravedad o baricentro de los individuos de la misma categoría de la variable cualitativa.

Intuitivamente una variable cualitativa y una cuantitativa están asociadas si los individuos de la misma clase o categoría tienen valores similares para esa variable cuantitativa. Más precisamente, es posible descomponer la variabilidad de la variable cuantitativa de acuerdo a la partición definida por las clases o categorías de la variable cualitativa. A partir de la ecuación de descomposición de la variancia total (Teorema de Huygens) tenemos:

$$\text{Variancia Total} = \text{Variancia entre clases} + \text{Variancia dentro de clases}$$

Podemos definir el siguiente coeficiente $R^2 = \frac{\text{Variancia entre clases}}{\text{Variancia Total}}$ este es el porcentaje de variancia de la variable cuantitativa explicado por la variable cualitativa; por lo tanto la intensidad general de la relación entre una variable cualitativa y una componente principal puede ser medida por el cuadrado del coeficiente de correlación entre la componente y la variable cualitativa. La significancia del valor de R^2 para explicar una componente utilizando la variable cualitativa puede medirse mediante el valor-P asociado a la prueba F global del efecto tratamiento de un Análisis de Variancia a una vía (Jérôme Pagès, 2015).

³ Las variables cualitativas no asumen valores numéricos sino categorías o clases, por ejemplo: la litología.

3.3.2. Representación e Interpretación

Tanto los individuos como las variables se pueden representar en los denominados planos factoriales que son conformados por las componentes principales, por ejemplo, el primer plano factorial está determinado por las dos primeras componentes principales. El eje horizontal corresponde a la primera componente principal y el eje vertical a la segunda. Por convención y debido a su naturaleza diferente, en general, los individuos y las variables se suelen representar en forma separada. Los individuos se representan como puntos en el plano factorial. El ACP utiliza la distancia Euclídea, luego la semejanza o la diferencia entre individuos se refleja en la distancia que los separa en el plano factorial. Puntos próximos en el plano factorial indican que esos individuos son similares en todas las variables originales y puntos alejados indican lo contrario.

Las variables son representadas en el plano factorial mediante vectores que nacen en el origen del sistema de coordenadas y que están limitados por el círculo de correlaciones de radio 1. Mientras más cercanas estén a este círculo, mejor es su calidad de representación en el plano factorial. Por otra parte, la relación entre ellas está representada por el ángulo y las direcciones que forman los vectores correspondientes. Ángulos agudos en la misma dirección indican relación directa, ángulo recto indica independencia o baja relación y ángulos de 180° en direcciones opuestas indican relación inversa. Los ángulos que forman las variables con cada componente indican la relación de esa variable con la componente y el aporte o contribución que hace a la conformación de esa componente.

En la gráfica de individuos se suelen utilizar elipses de confianza. Estas representan la región de la ubicación en plano factorial de cada categoría de una variable cualitativa suplementaria con una cierta confianza (usualmente el 95%). El centro de la elipse de confianza es el punto medio o baricentro de los individuos de la categoría. Las elipses o regiones de confianza son calculadas por métodos de remuestreo (*bootstrap*) y son una descripción empírica de la variabilidad de cada categoría. Se pueden pensar como un resumen gráfico de la nube de puntos de esa categoría. Contribuyen a la interpretación de la gráfica de individuos en el ACP puesto que permiten evaluar visualmente si dos categorías son diferentes o no (Husson *et al.*, 2005).

3.3.3. Análisis de *Clusters*

En el ACP los individuos son considerados en un espacio euclídeo de alta dimensionalidad y se estudian las similitudes entre individuos y las relaciones entre variables. El estudio de las similitudes entre individuos consiste en estudiar la forma de la nube de puntos. El ACP estudia esta nube

llevando la nube a un subespacio de menor dimensión preservando tanto como es posible la distancia entre los individuos. Otro modo de estudiar las similitudes entre individuos con respecto a todas las variables, es mediante el Análisis de *Cluster* o clasificación jerárquica. La clasificación jerárquica requiere definir qué distancia utilizar entre los individuos (Manhattan, Euclídea, etc.) y un método de aglomeración (Ward, centroide, etc.). Luego la jerarquía obtenida es representada mediante un árbol jerárquico denominado dendograma, donde los individuos quedan clasificados en grupos denominados *clusters*. El Análisis de *Cluster* también puede ser realizado a partir de las componentes principales obtenidas por el ACP. El ACP al reducir la multidimensionalidad del problema puede ser visto como un método para separar la señal y el ruido: las primeras dimensiones extraen la información esencial mientras que las últimas retienen el ruido presente en los datos. Entonces sin el ruido de los datos, la clasificación obtenida suele ser más estable que las clasificaciones obtenidas a partir de las distancias según las variables originales. El ACP es considerado como un paso de preprocesamiento antes de aplicar los procedimientos de *clustering*.

Los árboles jerárquicos considerados en esta tesis utilizan el criterio de aglomeración de Ward. Este criterio se basa en el Teorema de Huygens que permite particionar la variancia total en dos términos: variancia dentro de grupos y variancia entre grupos. La variancia total puede ser descompuesta mediante:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{I_q} (x_{iqk} - \bar{x}_k)^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q (\bar{x}_{qk} - \bar{x}_k)^2 + \sum_{k=1}^K \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{I_q} (x_{iqk} - \bar{x}_{qk})^2$$

Variancia Total= Variancia entre grupos + Variancia dentro de grupos

Donde x_{iqk} es el valor de la variable k para el individuo i del *cluster* q , \bar{x}_{qk} es la media de la variable k en el *cluster* q , \bar{x}_k es la media general de la variable k y I_q es el número de individuos en el *cluster* q (Husson *et al.*, 2005) (Rencher, 2003).

El método de Ward también es denominado como “método de la suma incremental de cuadrados”, porque funciona de la siguiente manera: sea AB el *cluster* conformado por la fusión del *cluster* A con el *cluster* B , si la variancia dentro del *cluster* A es SSE_A , la variancia dentro del *cluster* B es SSE_B y la variancia dentro del *cluster* AB es SSE_{AB} , entonces el algoritmo computacional que utiliza el método de Ward reúne los *clusters* A y B de modo tal de minimizar el incremento en la variancia general dentro de los grupos definida como:

$$I_{AB} = SSE_{AB} - (SSE_A + SSE_B).$$

Se puede demostrar que minimizar el incremento de I_{AB} es equivalente a minimizar las distancias entre *clusters*. De este modo, el método obtiene *clusters* lo más homogéneos posible.

3.4. Sistemas de Información Geográfica

Existen tantas definiciones sobre los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como disciplinas que utilización información georreferenciada. Una definición abarcativa propone (Korte, 2001) al definir al SIG como como un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica, y cuya principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados.

El SIG está conformado por una serie de subsistemas especializados en funciones diferentes:

- Subsistema de datos: se encarga de la entrada, gestión y salida de datos
- Subsistema de análisis: contiene los métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.
- Subsistema de visualización y creación cartográfica: a partir de los datos crea representaciones (mapas, leyendas, etc.)

4. Área de Estudio

4.1. Área de Estudio

El área de estudio abarca la totalidad del territorio de la provincia de Neuquén, Argentina. La provincia ocupa un área de 94.078 km² y se ubica al oeste del territorio argentino y ocupa el extremo noroeste de la Patagonia argentina, entre los 36° 39' y 41° 01' de latitud Sur y 68° y 71° 58' de longitud Oeste, Figura 4-1. Limita al norte del río Colorado con la provincia de Mendoza y al este del río Neuquén y al sur del río Limay limita con la provincia del Río Negro. Hacia el oeste, la Cordillera de los Andes es el límite natural con la República de Chile.

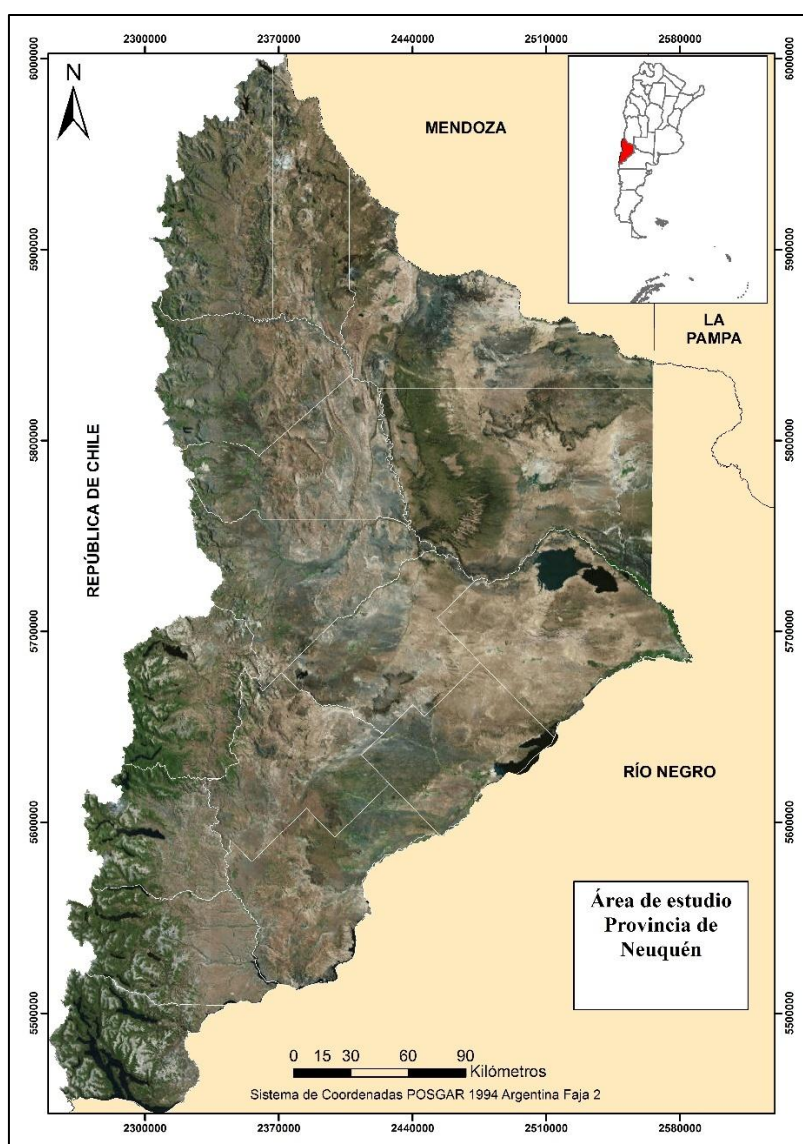


Figura 4-1 Área de estudio (elaborado en base a SIG-OTA, 2002)

4.1.1. Clima

Una síntesis del clima de la provincia fue elaborada por Pereyra *et al.* (2011) en la que divide a la provincia en dos zonas bien diferenciadas una de la otra, el sector occidental y el sector oriental. En primero, el clima está influenciado por la Cordillera de los Andes y por los cordones serranos subandinos que actúan como barrera de los vientos húmedos provenientes del Océano Pacífico. La masa de aire húmeda proveniente del Este es forzada a elevarse para sortear el obstáculo y al condensarse, descarga en forma de precipitaciones su humedad. En las zonas cercanas a la frontera internacional las precipitaciones alcanzan los 2500 mm anuales. En una franja de 100 km hacia el Este las precipitaciones disminuyen bruscamente alcanzando los 500 mm anuales. A partir de esa zona, en el sector oriental de la provincia las precipitaciones van disminuyendo hasta alcanzar los 200 mm y pueden alcanzar un mínimo de 150 mm anuales. En todos los casos la mayor parte de la lluvia cae en la estación invernal.

Con respecto a la temperatura, en el sector oriental (área que cubre la mayoría del territorio provincial) la temperatura media anual ronda entre los 12° y 14°C, mientras que en la porción occidental la temperatura media anual oscila entre los 8° y 12°C. Esta disminución se debe que este sector se encuentra a mayor altura y está más expuesta a los vientos del Oeste.

Por estos motivos, la mayor parte de Neuquén presenta un marcado déficit hídrico anual, con valores extremos en la zona de Añelo, mientras que en la estrecha franja cordillerana existe un exceso hídrico con déficits estacionarios pequeños en los meses estivales.

4.1.2. Suelos

Dentro de la provincia de Neuquén se reconocen cuatro órdenes dominantes: entisol, aridisol, molisol y andisol. Los entisoles son el orden más importante a nivel de cobertura areal, ocupando el 35% del territorio. Se ubican mayoritariamente en regiones áridas, no obstante, todos los suelos cultivados bajo riego son de este orden. Son suelos con escaso o nulo desarrollo pedogenético, no poseen horizontes diagnósticos, son profundos, muy permeables y tienen bajo contenido de materia orgánica. Los aridisoles se encuentran asociados a los entisoles y se localizan en regiones áridas, en los sectores estables del paisaje. Presentan uno o más horizontes diagnósticos y son los que presentan mayor grado de diferenciación pedogenética. Para más información el lector puede remitirse al trabajo de Ferrer *et al.* (1990).

4.1.3. Geología

Para comprender la vasta geología presente en la provincia de Neuquén, se puede dividirla en unidades discretas con características únicas. Para ello se seguirá la definición de provincias geológicas. Según Rolleri (1976), una provincia geológica es una región caracterizada por una determinada sucesión estratigráfica, un estilo estructural propio y rasgos geomorfológicos peculiares, siendo el conjunto expresión de una particular historia geológica. Este trabajo sigue los lineamientos de Ramos *et al.* (2011) que realizan un resumen de las provincias geológicas de la provincia de Neuquén. Figura 4-2 y Figura 4-3.

Las provincias geológicas más importantes de la provincia de Neuquén son: la Cordillera Principal, el Engolfamiento Neuquino y la Cordillera Patagónica.

La primera está constituida por depósitos marinos de edad jurásica y cretácica, asociadas a rocas volcánicas del arco magmático, representando por granitoides calcoalcalinos. Tiene una serie de cuencas longitudinales que parten los Andes en las Precordilleras Neuquinas Norte y Sur. Estas cuencas, la de Loncopué y la de Bío Bío – Aluminé, son grábenes extensionales parcialmente invertidos durante la compresión andina.

El Engolfamiento Neuquino está caracterizado por el plegamiento del relleno de secuencias mesozoicas y terciarias. El Engolfamiento está dividido en 2 partes por la Dorsal de Huincul, la más importante hacia el Norte y la subcuenca de Picún Leufú al Sur. El basamento está constituido por una compleja amalgamación de terrenos que generaron un frente de deformación que al colapsar en el Pérmico Tardío generó un magmatismo bimodal que originó al Gr. Choiyoi y de esta forma comenzó el relleno de la cubeta sedimentaria. Durante la apertura del océano Atlántico y la subducción de la placa Pacífica, se generó un arco volcánico que limitó una cuenca de trascarco, marcando el Ciclo Andino y el inicio de la etapa de *rift* (Mosquera & Ramos, 2005). En el Jurásico Inferior inició un ciclo de sedimentación marina y continental que refleja los episodios de calma y de variaciones paleoambientales (Tunik *et al.*, 2010). En el Cenomaniano el desarrollo de los depósitos continentales del Gr. Neuquén marcan la fase de antepaís y una tectónica compresional en la que se invirtieron estructuras extensionales tales como la Faja Plegada y Corrida del Agrío. Durante el Campaniano – Paleoceno se desarrollaron los depósitos del Gr. Malargüe, una sucesión sedimentaria continental y marina de 400 m. de potencia (Rodríguez, 2011). Estos sedimentos corresponden a la última inundación marina en la cuenca, esta vez, proveniente del Océano Atlántico. El alzamiento de la Cordillera de los Andes durante el Terciario dio por finalizada la

conexión de la cuenca con el océano Pacífico. La reactivación de la faja plegada y corrida durante el Mioceno marcó la culminación de la estructuración de la cuenca (Ramos, 1999; Ramos & Folguera, 2005).

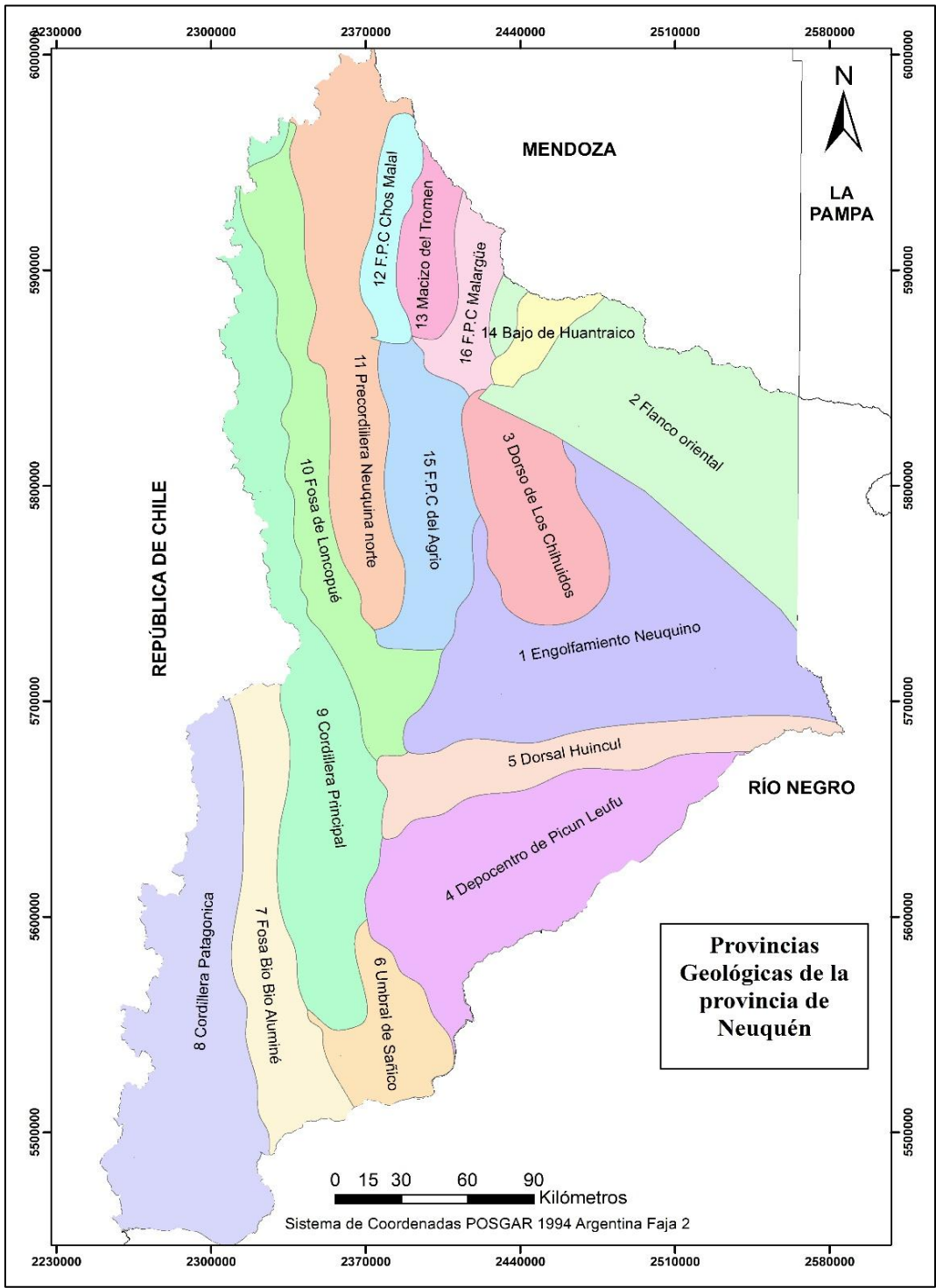


Figura 4-2 Provincias geológicas (Elaborado en base a Ramos et al. (2011))

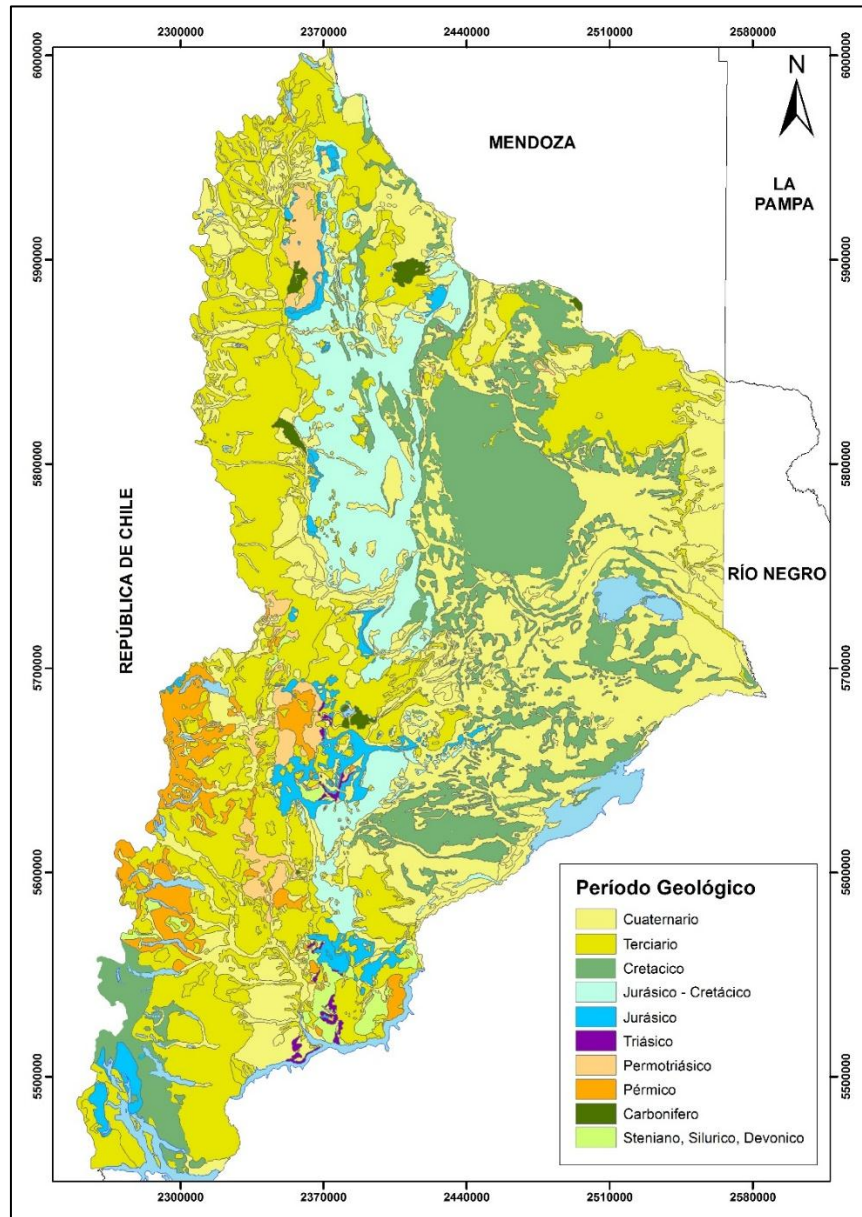


Figura 4-3 Geología de la provincia de Neuquén (Elaborado en base a SIG-OTA, 2002)

La Cordillera Patagónica se desarrolla hacia al Sur de la Cordillera Principal. Estas se diferencian ya que la primera expone el batolito patagónico y el basamento metamórfico del Paleozoico se encuentra aflorando. El límite lo ubican al Sur del Lago Aluminé a los 39°S (Turner, 1965; Ramos, 2000).

Los estratos sinorogénicos neógenos están comprendidos por depósitos sinextensionales oligocenos tardíos a miocenos tempranos expuestos en los Andes y en el pie de monte de la Cordillera Principal.

4.1.4. Hidrogeología

Los distintos grupos geológicos que conforman el relleno sedimentario de la Cuenca Neuquina presentan características litológicas y estructurales que condicionan la aptitud para el almacenamiento y distribución de aguas subterráneas (Colombino & Luengo, 2011). Estas son resumidas en la Tabla 4-1

Unidad Geológica y/o temporal	Litología	Ambiente de formación	Características del acuífero
Basamento cristalino	Metamorfitas, migmatitas granitoides	Continental	Permeabilidad secundaria. Buena calidad del agua. Escaso volumen
Triásico hasta Gr. Mendoza	Sedimentitas epiclásticas y carbonáticas, evaporitas	Marino a transicional	Permeabilidad buena a moderada. Acuíferos con alta mineralización
Gr. Neuquén	Areniscas y fangolitas	Continental	Permeabilidad buena- Acuíferos complejos
Gr. Malargüe	Fangolitas, evaporitas	Marino somero	Permeabilidad baja. Pobre favorabilidad para acuíferos
Gr. Molle	Andesitas, basaltos y piroclástitas	Continental	Permeabilidad secundaria. Buena calidad de acuíferos, escaso volumen
Paleógeno – Neógeno	Sedimentitas epiclásticas, piroclástitas	Continental, lagunar	Permeabilidad moderada a buena. Acuíferos de buena calidad
Colloncuyense	Depósitos piroclásticos, lavas y brechas volcánicas	Continental	Permeabilidad moderada, acuíferos de buena calidad y rendimiento
Fm. Río Negro	Depósitos arenosos y tobáceos	Continental	Permeabilidad moderada a baja, acuíferos de buena calidad
Basaltos de meseta	Flujos lávicos	Continental	Permeabilidad secundaria, buena calidad de agua
Rodados patagónicos	Rodados de volcanitas y plutonitas	Continental	Acuíferos de escaso volumen, aguas de elevada dureza
Depósitos fluvioglaciares y morenas	Acumulaciones glaciogénicas	Continental	Elevada permeabilidad, recarga rápida y permanente
Relleno aluvial reciente	Depósitos fluviales	Continental	Acuíferos de buena calidad

Tabla 4-1 Unidades geológicas y sus atributos geológicos. Extraído de Colombino & Luengo (2011)

5. Metodología

Al no hallar trabajos previos que propongan una metodología para la evaluación de los SEV, se propone la metodología que es sintetizada en la Figura 5-1.

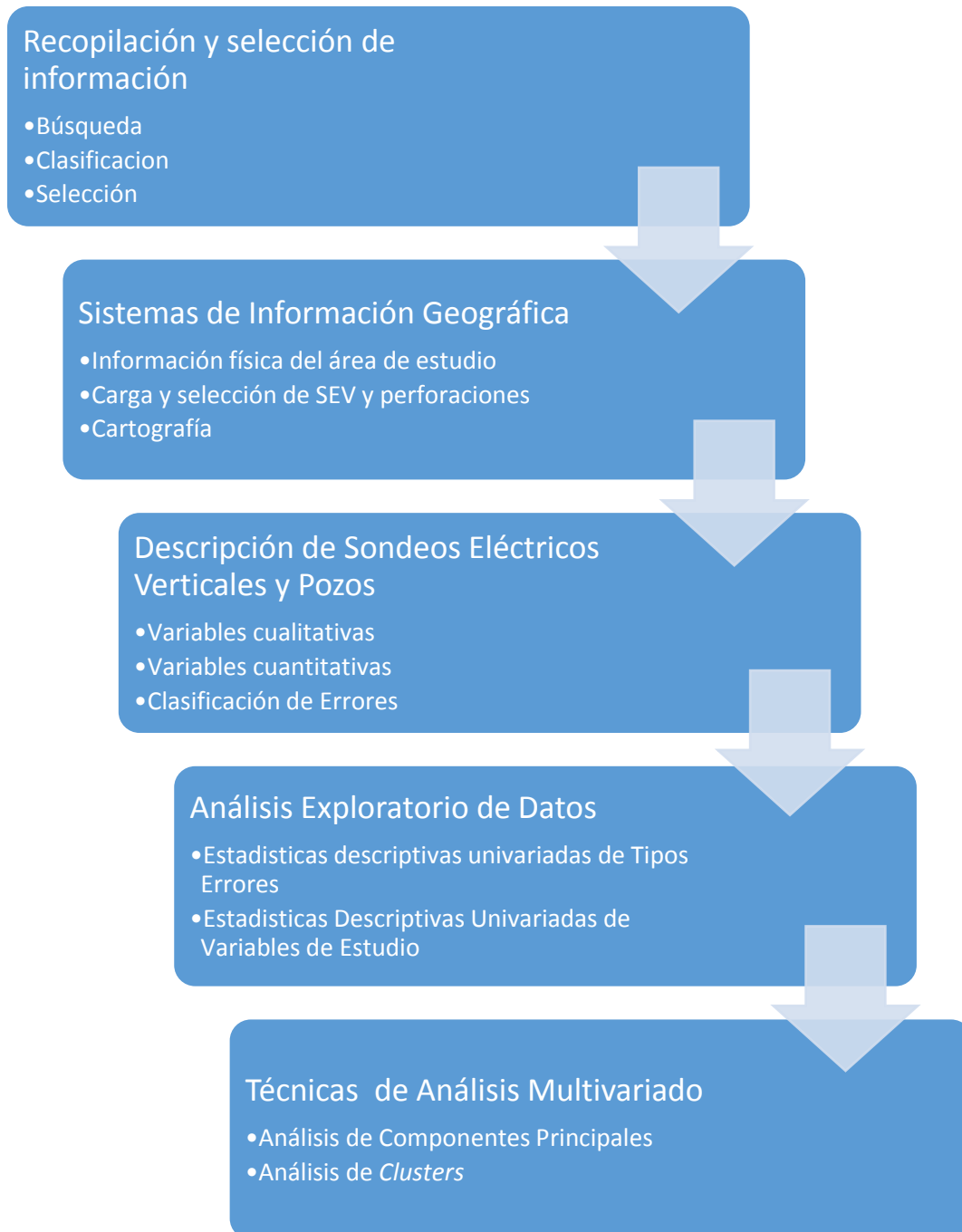


Figura 5-1 Metodología de trabajo propuesta

Se recopilaron más de 100 informes de prospección de aguas subterráneas, que en conjunto suman más de 348 SEV y 44 perforaciones. Esta información fue provista por profesionales, organismos públicos y empresas estatales, tales como la Subsecretaría de Recursos Hídricos de Neuquén y EPAS. Dicha información fue cedida a través de convenios de cooperación entre estas organizaciones y la Universidad Nacional del Comahue.

Los informes de SEV se presentaban separados de los de las perforaciones y además se encontró que no había una estandarización en el criterio de titular los informes por parte de los profesionales o empresas contratadas para la prospección, ni de los organismos que encargaron dichos estudios. Por lo tanto, para facilitar la tarea se cargaron las coordenadas de los mismos en un SIG para visualizar la ubicación de los SEV y de las perforaciones. Cabe mencionar que las coordenadas de los sondeos eléctricos y de las perforaciones tampoco se encontraban en un mismo sistema de coordenadas. Se estandarizaron las mismas al sistema de coordenadas POSGAR 1994 Argentina Faja 2, siguiendo las normativas del Instituto Geográfico Nacional.

Terminada la etapa de recopilación se seleccionaron los sitios en los que se contaban con el informe de SEV y el informe de la perforación. Se seleccionaron 26 sitios en los que en total se realizaron 100 SEV y 31 perforaciones (Figura 5-2 y Figura 5-3). La Figura 5-4 muestra la distribución de los pozos por departamentos y la Figura 5-5 la distribución por provincias geológicas.

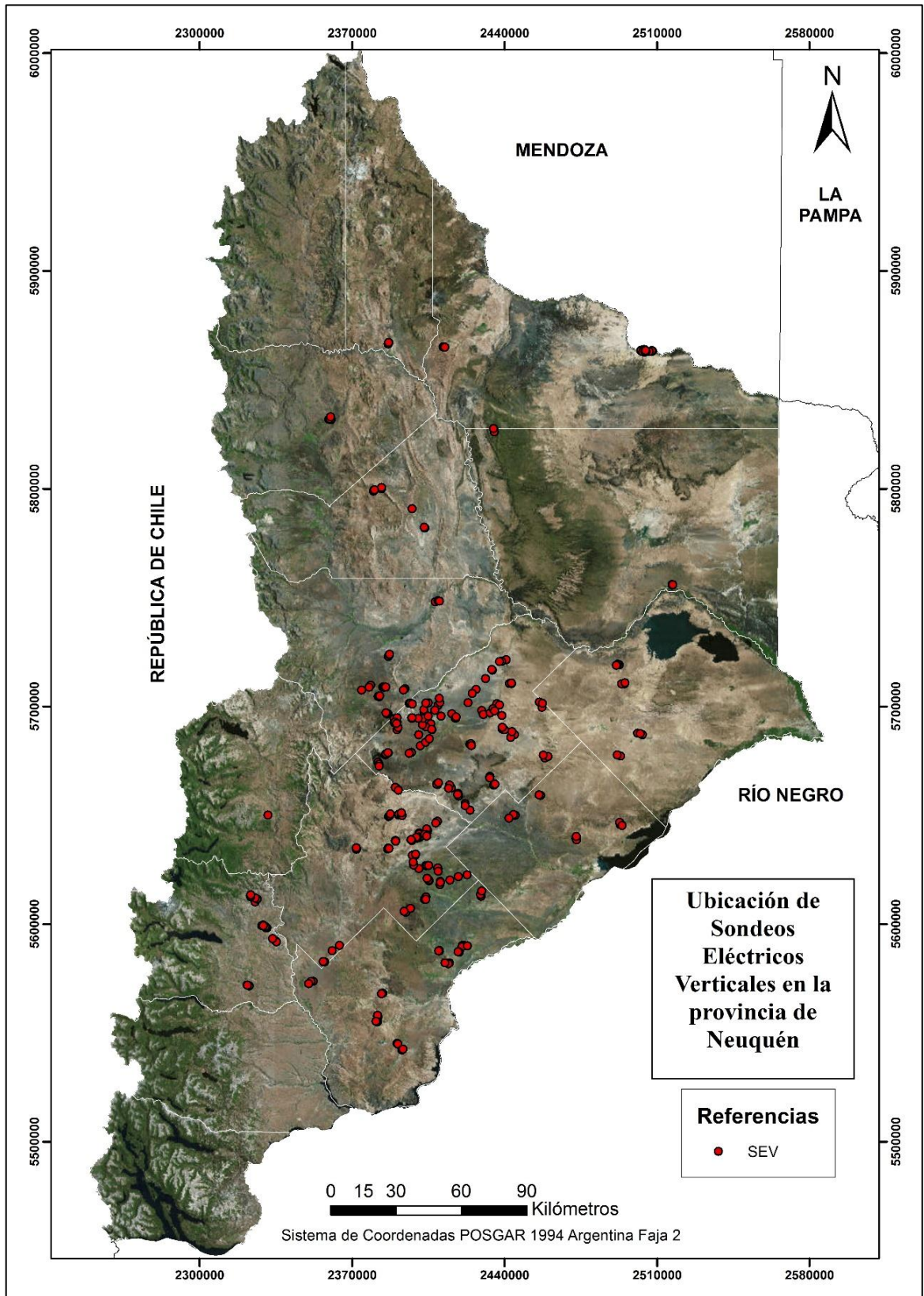


Figura 5-2 Ubicación de sondeos eléctricos verticales existentes

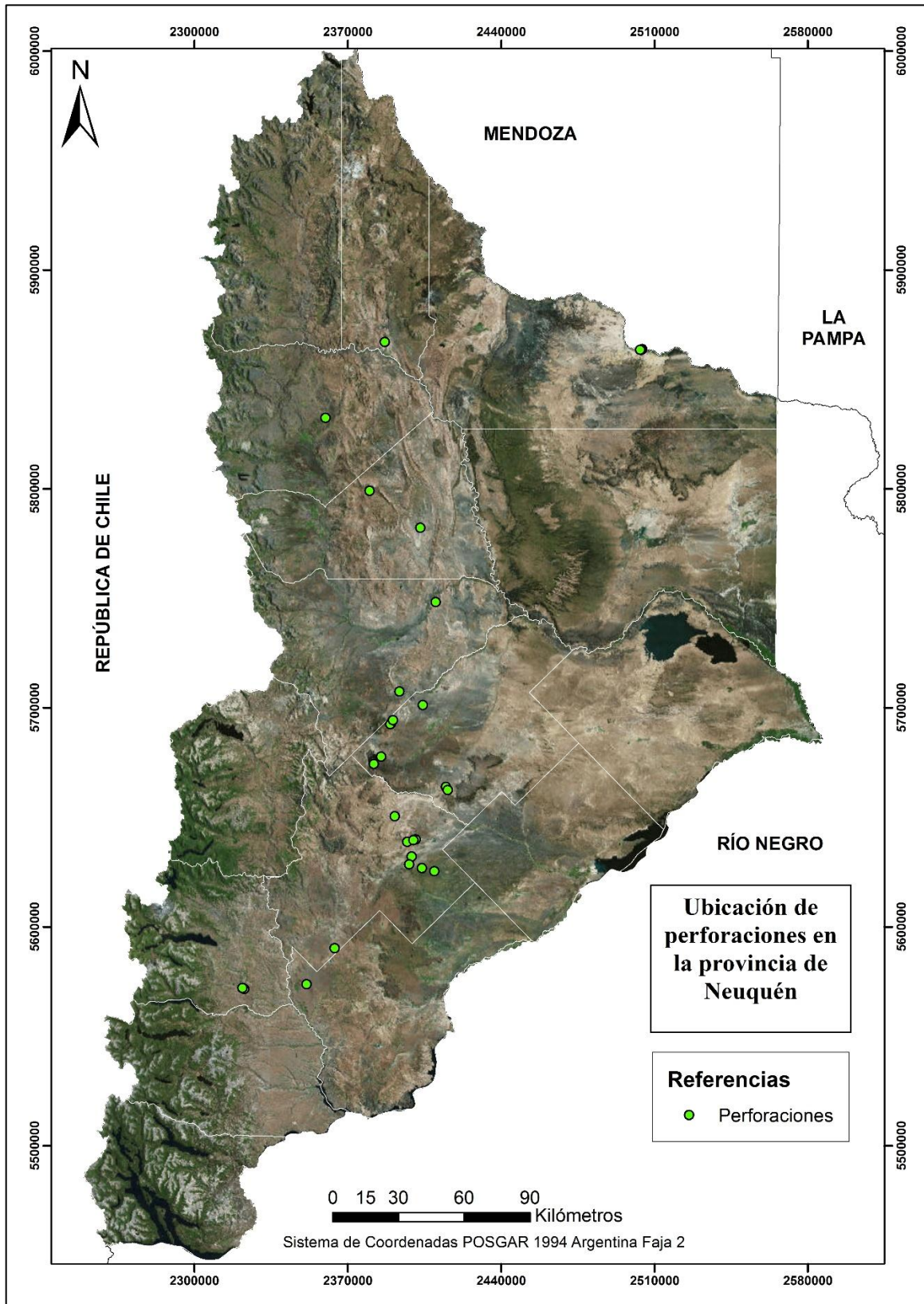


Figura 5-3 Ubicación de perforaciones relacionadas con estudios SEV

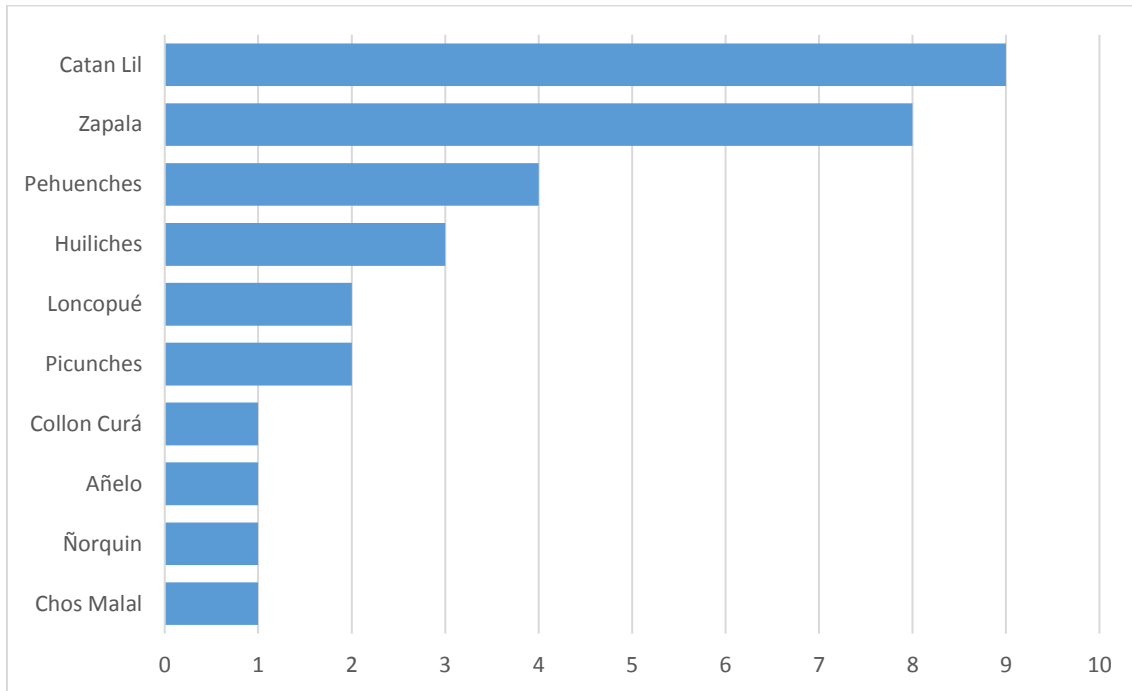


Figura 5-4 Frecuencia de perforaciones por departamentos

g

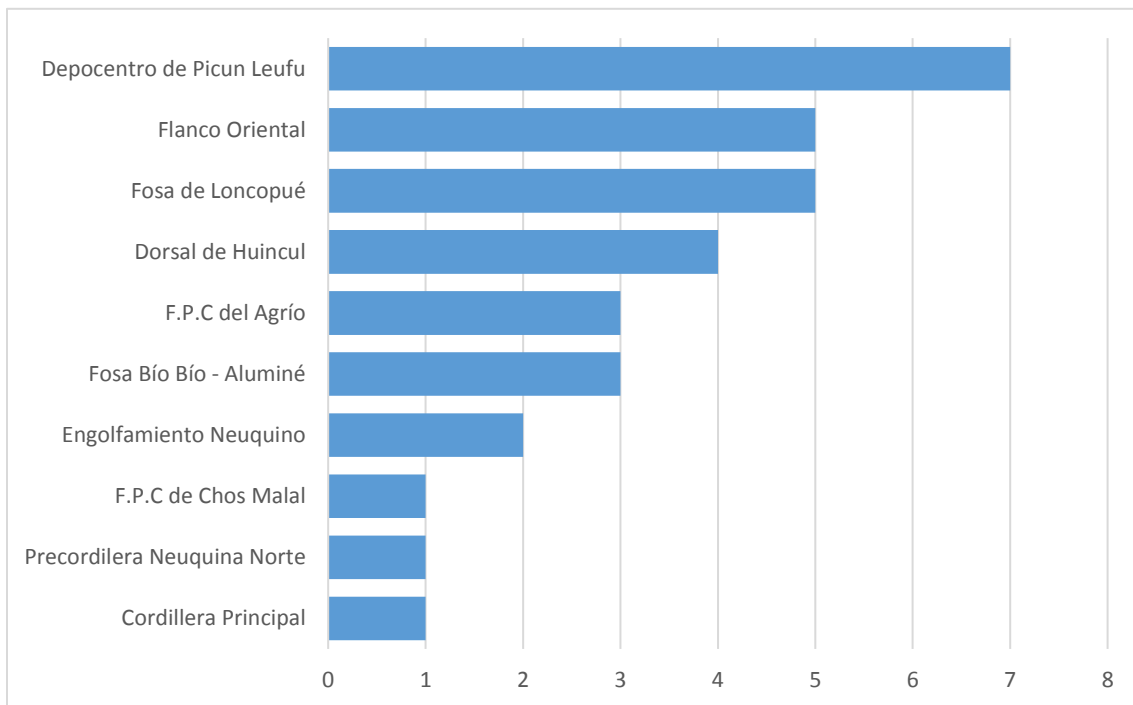


Figura 5-5 Frecuencia de perforaciones por provincias geológicas

5.1. Sistema de Información Geográfica

Finalizada la selección de la información, la misma fue cargada en un SIG, utilizando el *software* ArcGIS™ 10.2. En este SIG se pudieron reconocer los sitios en los que se habían realizado perforaciones en base a SEV previos. Posteriormente, se analizaron cada uno de ellos según la geología y provincia geológica.

5.2. Descripción de Sondeos Eléctricos Verticales y Perforaciones

Terminada la selección de la información a analizar, se describieron las perforaciones y el SEV asociado a ella. La información fue descrita a través de variables cuantitativas y cualitativas. Estas variables son: Litología, Ambiente, Unidad Estratigráfica, Provincias Geológicas, Probables Niveles Saturados de agua, Presencia de Agua, Profundidad de Perforación, Niveles Saturados de agua, Errores entre Niveles Probables y Encontrados, Nivel Estático, Nivel Dinámico, Caudal y Conductividad.

Para la evaluación de resultados se consideró la capa acuífera más somera interpretada en los informes de SEV. Esto se debe a que si durante la perforación se encuentra una capa acuífera que satisfaga las condiciones de calidad y cantidad para el abastecimiento de pobladores rurales, no es necesario continuar con los trabajos de perforación. Además del costo económico que conlleva profundizar el sondeo innecesariamente, podría ser riesgoso continuar la perforación, ya que al comunicar 2 o más acuíferos por medio de una perforación, pueden surgir problemas de calidad de agua y/o de contaminación al mezclarse las aguas. Por lo anterior, se hizo énfasis en el techo y el espesor de la primera capa litológica interpretada como acuífero.

Las descripciones de los recortes de perforación (*cutting*) no son lo suficientemente detalladas, por lo general la granulometría es imprecisa, y no siguen un mismo criterio de clasificación. Como ejemplo de ello se muestra la Figura 5-6. Por lo tanto, fue necesario reclasificar la litología en grandes grupos.

La composición litológica atravesada es la siguiente:	
0-3 metros-	arena fina media con restos de roca
3-4 metros	-Limo con arcilla
4-7 metros-	arena cementada y arcillas
7-12 metros	Arena cementada con arcillas
12-17	Piedra laja con algo de arcillas
17-19	Arcilla con grava tipo cuarzo
19-21	Arena muy fina cementada con algo de arcillas+
22-24	Pizarra

Figura 5-6 Ejemplo de descripción de cutting

Con las salvedades explicadas anteriormente, se ordenaron las variables descriptivas utilizadas de la siguiente manera:

- Litología: areniscas, areniscas intercaladas con sedimentos finos, areniscas intercaladas con sedimentos gruesos, gravas, basaltos y “mix”. De esta última clase, solamente una perforación encuadra en esta clasificación y atravesó según el control geológico: pelitas, areniscas, gravas, basaltos y pizarras.
- Topes Esperados: profundidad, en metros, hasta la primera capa de agua interpretados en el SEV
- Topes Observados: profundidad, en metros, hasta la primera capa de agua durante la perforación del pozo
- Espesor Esperado: espesor de la capa acuífera esperado predicha por el SEV
- Espesor Observado: espesor de la capa acuífera observado durante la perforación del pozo
- Provincia Geológica,
- Profundidad final de la perforación (m),
- Caudal de agua extraído
- Conductividad eléctrica del agua determinada en el pozo
- Resistividad del acuífero registrada en el SEV

5.3. Análisis exploratorio de datos

5.3.1. Estadística descriptiva univariada de Tipos de Errores

Se evaluaron las interpretaciones de los SEV comparándolas con los resultados de las perforaciones. Se clasificaron 4 tipos de errores (Tabla 5-1).

Tipo de Error	Descripción
I	Error de profundidad
II	Error de litología
III	Salinidad por encima de niveles para agua potable
IV	Indicar agua y que no halla

Tabla 5-1 Tipos de Errores descriptos

5.4. Técnicas de Análisis Multivariado

5.4.1. Análisis de Componente Principales

Para realizar un ACP existen diversos *softwares* especializados. En este trabajo se utilizó el paquete FactoMineR (Lê, S. *et al.*, 2008). Este paquete de herramientas es especializado en el análisis exploratorio multivariado y se ejecuta en el ambiente de análisis estadístico R (R Core Team, 2019). R y todos los paquetes desarrollados para ese ambiente son gratuitos y de uso libre. FactoMineR permite, además del clásico Análisis de Componentes Principales, disponer de otros elementos que ayudan a la interpretación tales como la incorporación de variables cualitativas y cuantitativas suplementarias, es decir, que son representadas en el plano principal pero no intervienen en la obtención de las componentes principales. El paquete FactoMineR también proporciona ciertas salidas de ayuda a la interpretación de las componentes y permite efectuar el Análisis de *Clusters* a partir de las componentes principales proporcionadas por el ACP.

Los pasos para realizar un Análisis Exploratorio Multivariado son los siguientes:

1. Estudio de relación entre variables mediante matriz de dispersión y matriz de correlación de Pearson
2. Realización del ACP: Obtención de las componentes principales.
3. Estudio de los variables: representación de éstas en el plano principal

-
4. Estudio de los individuos: representación en el plano principal, identificación de grupos y de individuos atípicos.
 5. Caracterización de individuos y grupos de individuos en relación a las variables estudiadas.
 6. Aplicación del Análisis de *Clusters* a partir del ACP
 7. Descripción de los *clusters* o grupos de individuos obtenidos con el Análisis de *Clusters*

6. Resultados y Discusión

6.1. Datos seleccionados

La Figura 6-1 muestra las perforaciones propuestas por un SEV y que fueron utilizadas en el análisis estadístico.

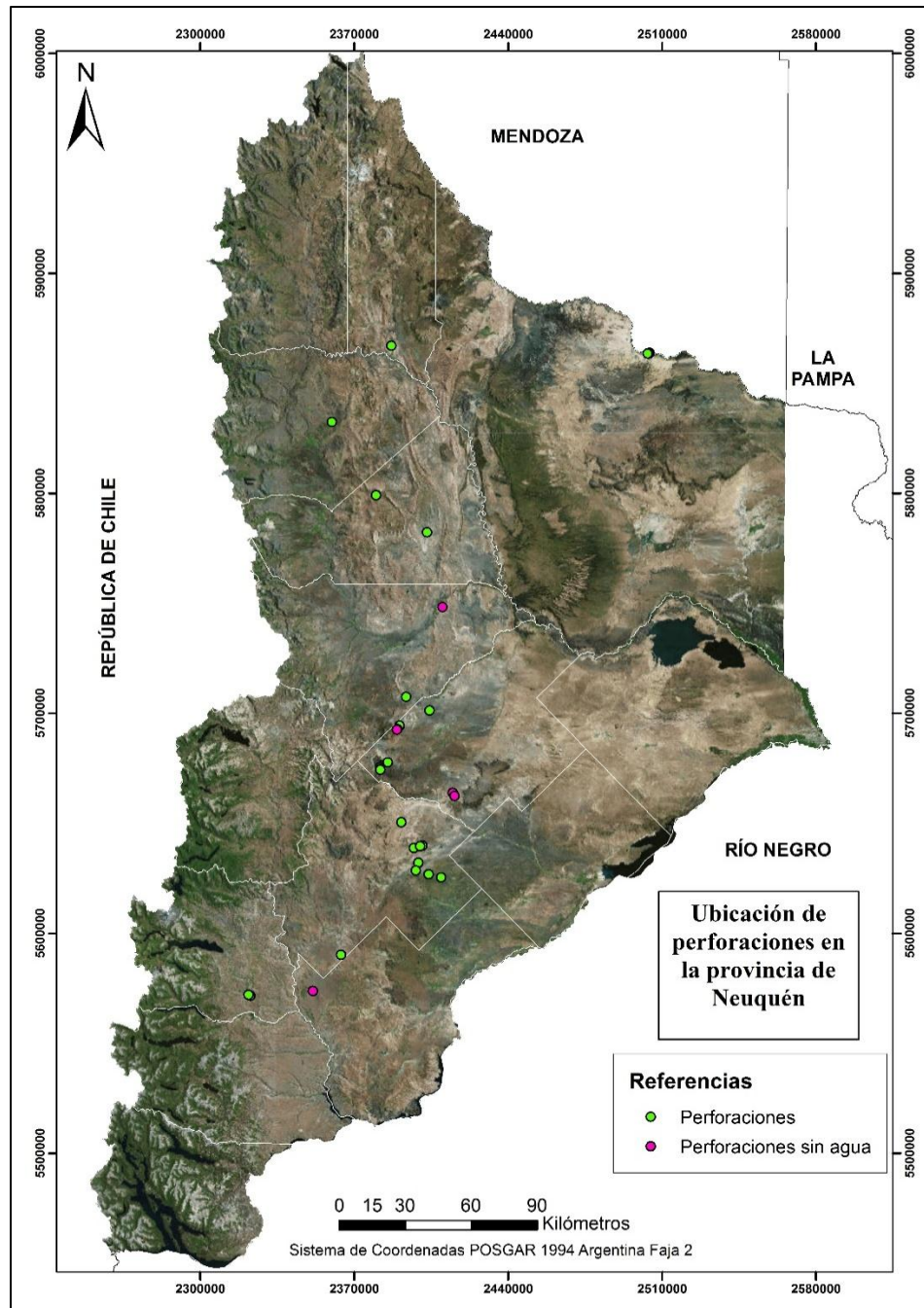


Figura 6-1 Ubicación de perforaciones y SEV seleccionados

6.2. Descripción de las variables seleccionadas en los sitios escogidos

A continuación, se presentan las estadísticas descriptivas univariadas de las variables cuantitativas analizadas. La Tabla 6-1 muestra la media, desvío estándar, coeficiente de variación, mínimo, cuartil inferior (Q1), mediana, cuartil superior (Q3), máximo, cantidad de datos disponibles (N) y datos no disponibles (NA) en 25 sitios que cumplen la disponibilidad de la información requerida de las variables a estudiar, a excepción de 4 sitios que no se cuenta con datos de caudal.

Variable	Media	Desvío Estándar	Coef. de Variación	Min	Q1	Mediana	Q3	Máximo	N	NA
Topo Esperado	10,75	9,81	0,91	0,7	3,7	6	17	31	25	0
Topo Observado	7,71	6,45	0,83	1	3	6	10,3	24	25	0
Espesor Esperado	13,64	9,42	0,69	3	6,8	10	15	34	25	0
Espesor Observado	15,34	13,68	0,89	0	6	10	23	55	25	0
Resistividad	126,74	111,27	0,87	6,3	39,2	100	180	350	25	0
Caudal	22,35	38,45	1,72	0,16	1,8	4	15	115,71	21	4
Prof. Perforación	40,56	27,43	0,67	10,6	24	35	50,5	122	25	0

Tabla 6-1 Estadística descriptiva univariada de las variables estudiadas

Se observa que el caudal es el que presenta la mayor variabilidad relativa entre las variables estudiadas (mayor coeficiente de variación). Esto refleja los distintos ambientes geológicos analizados en este estudio. La media de la profundidad de las perforaciones indica que se trata de pozos en acuíferos someros.

6.3. Errores observados en la interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales

La población estadística a estudiar comprende todas las perforaciones propuestas a través de la técnica de Sondeo Eléctrico Vertical en la provincia de Neuquén. Se reconocen un total de 31 perforaciones.

Se realizó un análisis exploratorio de datos correspondiente a los tipos de errores. En la Tabla 6-2 se muestra la distribución de los Tipos de Errores y la Figura 6-2 muestra la frecuencia absoluta de los mismos.

Se observa que el error más frecuente es el Error I, es decir una diferencia de 20% o más entre la profundidad del agua interpretada en el SEV y la observada al realizar la perforación. El Error III es el menos frecuente pero solamente 7 perforaciones cuentan con mediciones de conductividad del agua y/o de Sólidos Disueltos Totales (TDS, por sus siglas en inglés) y por ende el Error III (diferencia de conductividad observada y esperada) no sería representativo en este estudio.

A pesar de ser 31 perforaciones, se realizaron 33 observaciones de errores debido a que en distintas oportunidades se detectaron más de un tipo de error en la perforación.

Error	f_i	h_i	$h_i\%$
I	18	0,55	55
II	5	0,15	15
III	4	0,12	12
IV	6	0,18	18
Total	33	1,00	100

Tabla 6-2 Distribución de frecuencias de los Tipos de Errores

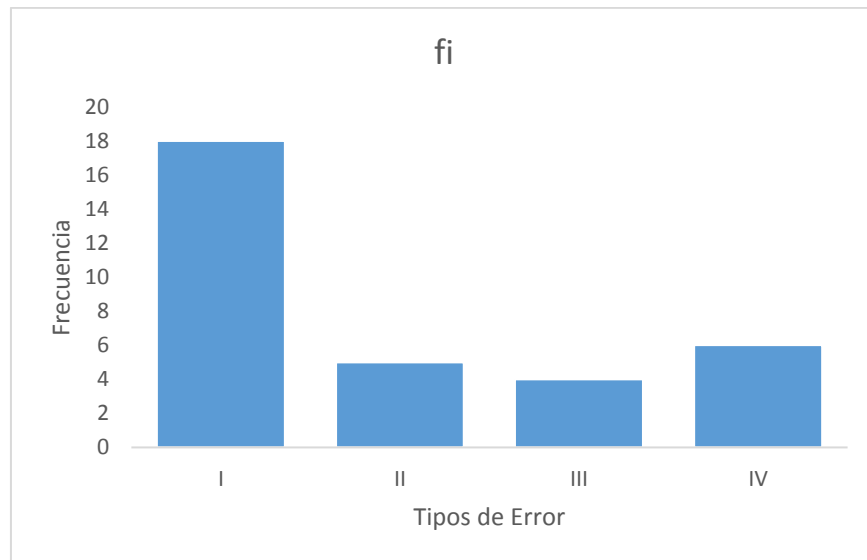


Figura 6-2 Frecuencia absoluta de Errores

6.4. *Performance* de las perforaciones propuestas y realizadas

En este estudio un resultado importante es conocer el éxito de las perforaciones propuestas a través de la técnica de Sondeo Eléctrico Vertical: de las 31 perforaciones estudiadas, se encuentra que aproximadamente un 80% de las mismas son exitosas al hallar agua (Tabla 6-3).

	Nº	Porcentaje (%)
Satisfactorias	25	80,6
No Satisfactorias	6	19,4
Totales	31	100

Tabla 6-3 Éxito de las perforaciones

6.5. Valores de resistividades encontrados en los ambientes litoestratigráficos de la provincia de Neuquén

En función de los datos utilizados en este trabajo se elaboró la tabla de resistividades para cada grupo de litologías saturadas con agua (Tabla 6-4). Cabe repetir la salvedad enunciada en el punto 5.2 sobre la descripción de las perforaciones.

Ambiente litoestratigráfico	Resistividad ($\Omega.m$)		
	Mínima	Promedio	Máxima
Areniscas intercaladas con pelitas	21,3	44	71,1
Areniscas	39,2	72,2	109
Areniscas intercaladas con conglomerados	36,9	129,7	350
Gravas fluviales, "limpias" con bajo contenido de sales	100	221,6	330

Tabla 6-4 Tabla de resistividades para distintos tipos de ambientes

Los valores de resistividad presentados anteriormente se encuentran dentro de los márgenes de variación de resistividad de rocas presentados por Orellana (1972). Se debe conocer que existen casos, que la resistividad de algunas rocas puede ser menor o mayor que los límites indicados.

6.6. Relaciones entre las variables

6.6.1. Correlaciones entre las variables predichas en el Sondeo Eléctrico Vertical y observadas en las perforaciones

La correlación entre variables se midió mediante el coeficiente de correlación de Pearson r . Este coeficiente se utiliza para medir el tipo y la intensidad de la relación lineal entre variables cuantitativas y toma valores entre $[-1;1]$.

Si $r = 0$ indica que no existe relación lineal entre las variables. Si $r > 0$ indica relación es lineal directa, si $r < 0$ indica relación lineal inversa. A medida que el coeficiente toma valores que se van alejando de cero, la relación entre las variables aumenta. En el extremo positivo, si r es igual a 1, indica que hay una relación lineal directa perfecta entre las dos variables y por último si $r = -1$, existe una relación lineal inversa perfecta.

La Tabla 6-5 muestra las correlaciones entre variables utilizando el coeficiente de correlación de Pearson r ; entre paréntesis se detalla el valor P de la prueba de correlación. Se destacan en negrita los coeficientes de correlación que resultaron significativos después de ajustar cada valor P por el método de Holm de comparaciones múltiples⁴. Las siguientes variables tienen una relación lineal directa altamente significativa.

- Espesor Esperado y Tope Esperado $r = 0.7753$ (<0.0001).
- Espesor Esperado y Tope Observado $r = 0.7161$ (<0.0001).
- Espesor Observado y Tope Esperado $r = 0.6924$ (0.0001).

Analizando la relación entre las variables “Espesor Esperado” y “Espesor Observado”, $r = 0,3889$; la prueba del coeficiente de correlación de Pearson indica un valor $p = 0,054$ en consecuencia la relación directa entre ambas variables no es significativa. Entre las variables “Tope Esperado” y “Tope Observado”, $r = 0,4941$; la prueba del coeficiente de correlación de Pearson indica un valor $p = 0,012$ en consecuencia la relación directa entre ambas variables es significativa.

⁴El método de Holm es uno de los métodos de corrección o ajuste del valor P que se utiliza para controlar el incremento del Error tipo I al efectuar simultáneamente una familia de pruebas de hipótesis.

	Caudal	Espesor Esperado	Espesor Observado	Resistividad	Tope Esperado	Tope Observado	Prof. Perforación
Caudal	1	-0.2839	-0.2114	-0.0641	-0.3540	-0.5009	-0.5742
Espesor Esperado	-0.2839	1	0.3889	0.2366	0.7753	0.6924	0.0422
Espesor Observado	-0.2114	0.3889	1	-0.2270	0.7161	0.0105	0.3786
Resistividad	-0.0641	0.2366	-0.2270	1	-0.2785	0.2793	-0.3275
Tope Esperado	-0.3540	0.7753	0.7161	-0.2785	1	0.4941	0.3424
Tope Observado	-0.5009	0.6924	0.0105	0.2793	0.4941	1	0.1204
Prof. Perforación	-0.5742	0.0422	0.3786	-0.3275	0.3424	0.1204	1

Tabla 6-5 Matriz de Correlación de Pearson.

Llama la atención la importante relación lineal directa que existe entre el “Tope Observado” y el “Espesor Esperado”. Esta relación se puede explicar de forma que a medida que aumenta la profundidad de investigación del SEV, la resolución vertical va empeorando, las capas eléctricas interpretadas tienen que ser cada vez más potentes para poder discriminar su techo y base.

6.6.2. Relaciones de las variables en el análisis multivariado

La Figura 6-3 representa las variables estudiadas en el primer plano factorial formado por las dos primeras componentes principales. Las variables se representan como vectores con origen en el origen del sistema de coordenadas (Ver Representación e Interpretación 3.3.2).

Este plano factorial retiene el 66,94% de la variabilidad de los datos, correspondiendo 42,56% al primer eje factorial y un 24,38% al segundo eje factorial.

Se puede apreciar que las variables “Espesor Esperado” y “Tope Esperado” son las que más asociación positiva o directa tienen con el primer eje factorial. Las variables “Tope Observado” y “Espesor Observado” también están asociadas positivamente a este eje, pero en menor medida. “Profundidad de Perforación” y “Caudal” están mal representadas en el primer eje.

El segundo eje está fuertemente asociado de manera positiva con la variable “Resistividad”. La variable “Caudal” tampoco está bien representada en el segundo eje.

Se observa que el par conformado por las variables “Tope Observado” y “Tope Esperado” tienen dirección en el mismo sentido y conforman un ángulo agudo indicando una relación directa de cierta importancia. Lo mismo ocurre con las variables “Espesor Esperado” y “Espesor Observado”, pero en

este caso la relación directa es más débil dado que el ángulo agudo es mayor. Esto resultados concuerda con los test del coeficiente de correlación presentados en la subsección 6.7.1.

Por otra parte, si bien la variable “Caudal” no está bien representada, la relación entre ésta y “Espesor Esperado” como así también con “Tope Esperado” sería inversa. Este comportamiento se explica porque las perforaciones que tuvieron mayores caudales, están ubicadas en las cercanías de cursos de ríos y el recurso es explotado en el acuífero subálveo, generalmente localizado en profundidades someras.

A su vez las variables “Resistividad” y “Caudal” serían independientes dados que sus representaciones forman un ángulo de 90°. Esto indicaría que el método no se puede utilizar para predecir los volúmenes de agua disponibles.

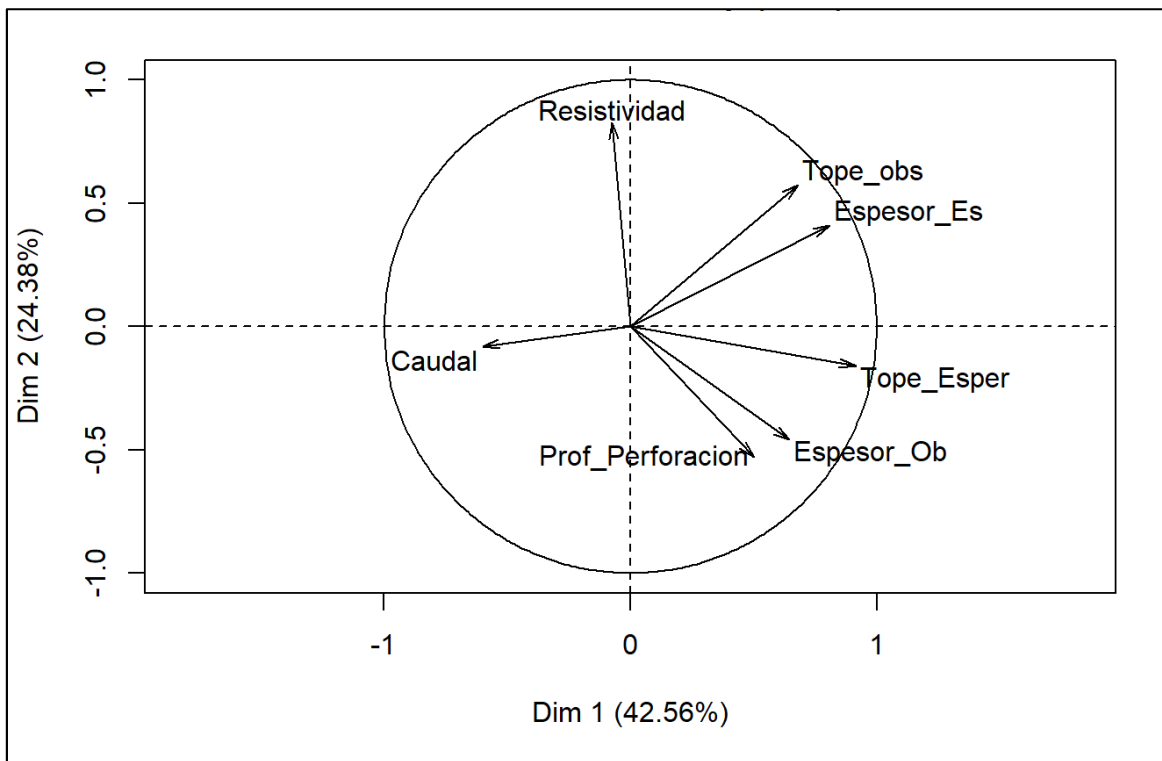


Figura 6-3 Representación de las variables en el Análisis de Componentes Principales

6.7. Caracterización de las perforaciones

Los pozos en los que no se encontró agua (seis pozos secos) fueron incluidos en el ACP como individuos suplementarios.

6.7.1. Agrupamiento de las perforaciones mediante Análisis de Componentes Principales

En el primer plano factorial se presentan todas las perforaciones como puntos circulares. Cada punto está etiquetado por el número de identificación del pozo en el archivo. Además, los pozos se representaron mediante colores, según la litología atravesada. Se complementó la representación con el agregado de los baricentros de cada litología (punto cuadrado) y las elipses de 90% de confianza de cada litología. Figura 6-4.

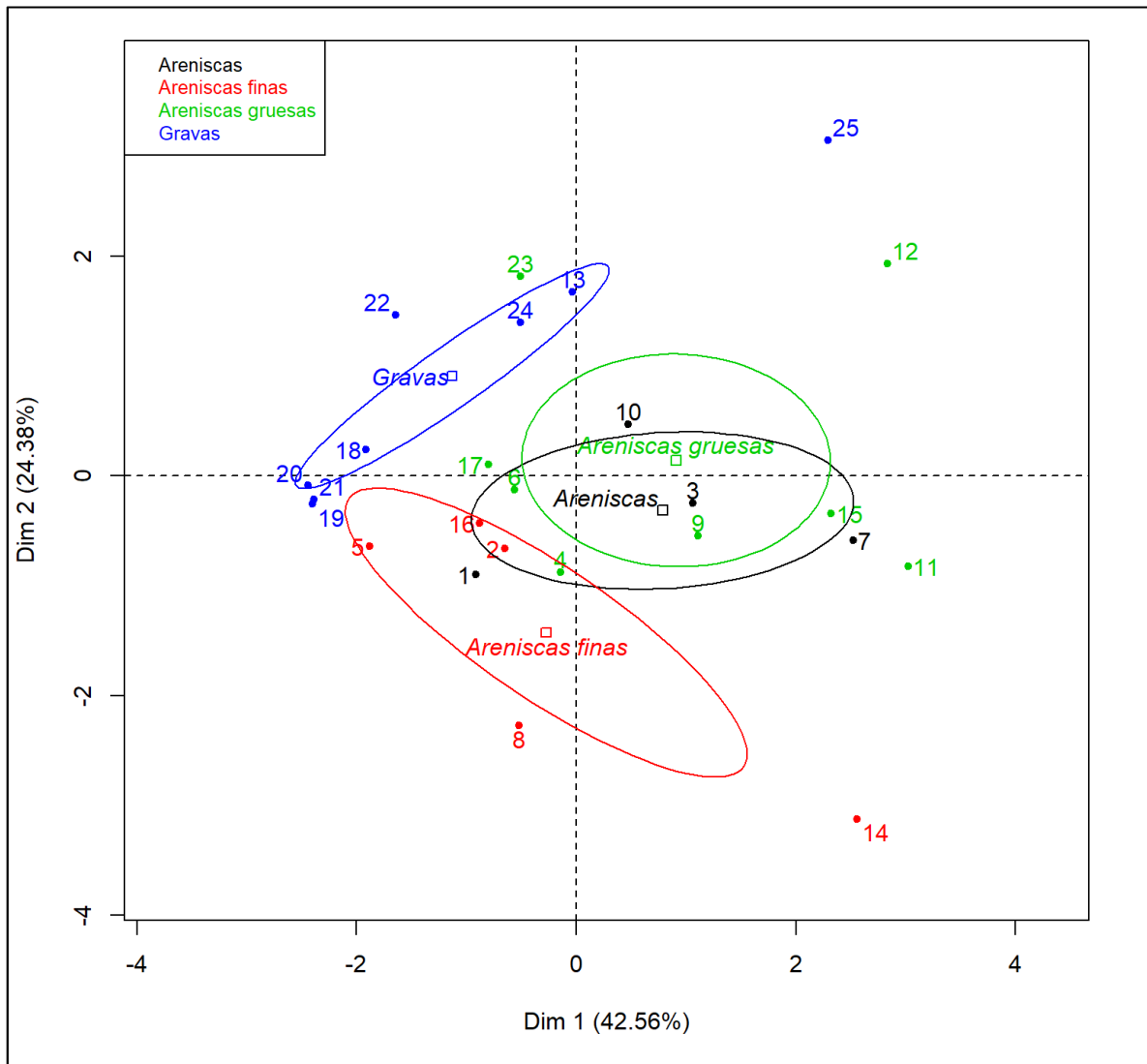


Figura 6-4 Representación ACP de pozos clasificados según litologías.

De la Figura 6-4 se pueden realizar las siguientes conclusiones:

-
1. En el primer eje factorial (Dim 1) no existe un ordenamiento o gradiente de litologías bien definido. El coeficiente R^2 no es significativo indicando que no hay asociación entre la litología y el primer eje.
 2. En el segundo eje factorial (Dim 2) se aprecia tal ordenamiento. El coeficiente $R^2 = 0,41$ es significativo (valor $P = 0,01$) indicando que hay asociación entre la litología y el segundo eje (ver Anexo: Salidas de Análisis de Componentes Principales: Descripción automática de la dimensión). De abajo hacia arriba se muestran: areniscas intercaladas con finos, areniscas, areniscas intercaladas con gruesos y finalmente gravas. Esto evidencia que la resistividad de las rocas que contienen agua dulce aumenta con el tamaño de grano.
 3. Las perforaciones que atravesaron areniscas intercaladas con finos, areniscas y areniscas intercaladas con gruesos no se encuentran bien diferenciadas ya que sus elipses se solapan y los baricentros se encuentran próximos. Una explicación posible es que, al clasificar las perforaciones en grandes grupos formados a *grosso modo* por intercalaciones de litologías de granulometría variable, se induce a un error que se refleja de esta manera. Cabe hacer mención que en el 44% de las perforaciones que se encuentran dentro de las elipses de confianza presentan informes técnicos de perforación en los que no se puede identificar de manera correcta la litología o el acuífero explotado.
 4. Las perforaciones clasificadas como gravas se ubican a la izquierda del primer eje factorial y con coordenadas positivas en el segundo eje. Esto indica que en gravas se observan valores altos de resistividades y caudales, tal como se explica en el punto 2.
 5. Las areniscas intercaladas con finos se localizan en la parte inferior del segundo eje factorial, ya que presentan resistividades bajas a medias.

6.7.2. Agrupamiento de perforaciones mediante *clusters*

Aquellas perforaciones que comparten ciertas características parecidas u homogéneas en todas las variables (o al menos en las dos primeras componentes principales) y distintas a los demás son agrupados en un mismo *cluster*.

La Figura 6-5 presenta el dendograma o árbol jerárquico obtenido a partir de las dos primeras componentes principales. Se observa que quedaron determinados cinco *clusters*.

La Figura 6-6 muestra los mismos *clusters* representados en el primer plano factorial. En ambas figuras, los *clusters* son diferenciados mediante colores. Cada grupo se distingue en que en una o más de las variables analizadas en este estudio, poseen medias marcadamente mayores o menores a la media general y desvíos estándares inferiores al desvío general según se detalla en la Tabla 6-6.

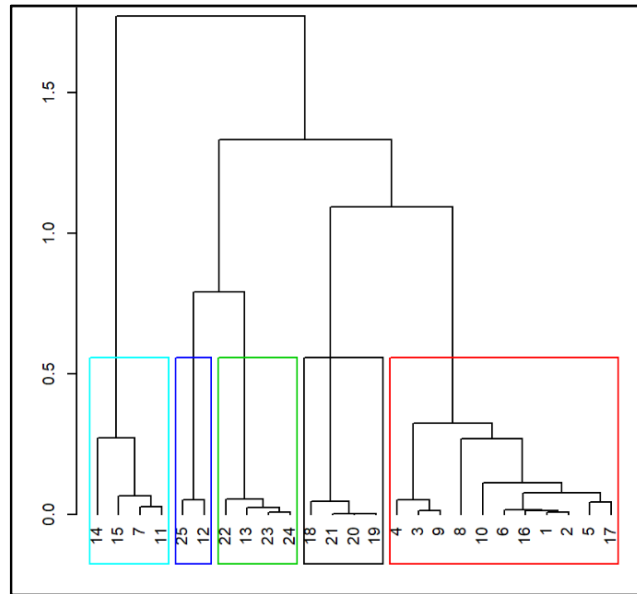


Figura 6-5 Dendrograma de clusters

	v test	Media Cluster	Media Gral.	D.E. Cluster	D.E. Gral	valor p
CLUSTER 1						
Caudal	4,62	97025	22355,238	1.995e+04	34394,82	0,08564
Tope Obs.	-2,06	1,6	7,71	5.000e-01	6,32	3.866e-02
Prof. Perforación	-2,29	11,68	40,56	6.572e-01	26,88	2.158e-02
CLUSTER 2						
Resistividad	3,93	327,5	126,7	17,85	109,02	8.243e-05
CLUSTER 3						
Espesor Obs.	-2,08	7,72	15,34	6,58	13,4	0,03678
Resistividad	-2,68	59,43	126,74	28,55	109,02	0,02331
Espesor Esperado	-2,8	6,58	13,636	2,8	9,23	0,00503
CLUSTER 4						
Espesor Obs.	4,14	35,5	15,34	11,28	13,4	3.465e-05
Tope Esperado	3,83	24,17	10,76	6,03	9,61	1.236e-04
Espesor Esperado	2,28	21,3	13,63	7,9	9,23	2.227e-02
CLUSTER 5						
Tope Obs.	3,72	24	7,71	0	6,32	0,00019
Espesor Esperado	2,94	32,45	13,63	0,55	9,23	0,00323

Tabla 6-6 Descripción de clusters mediante variables cuantitativas

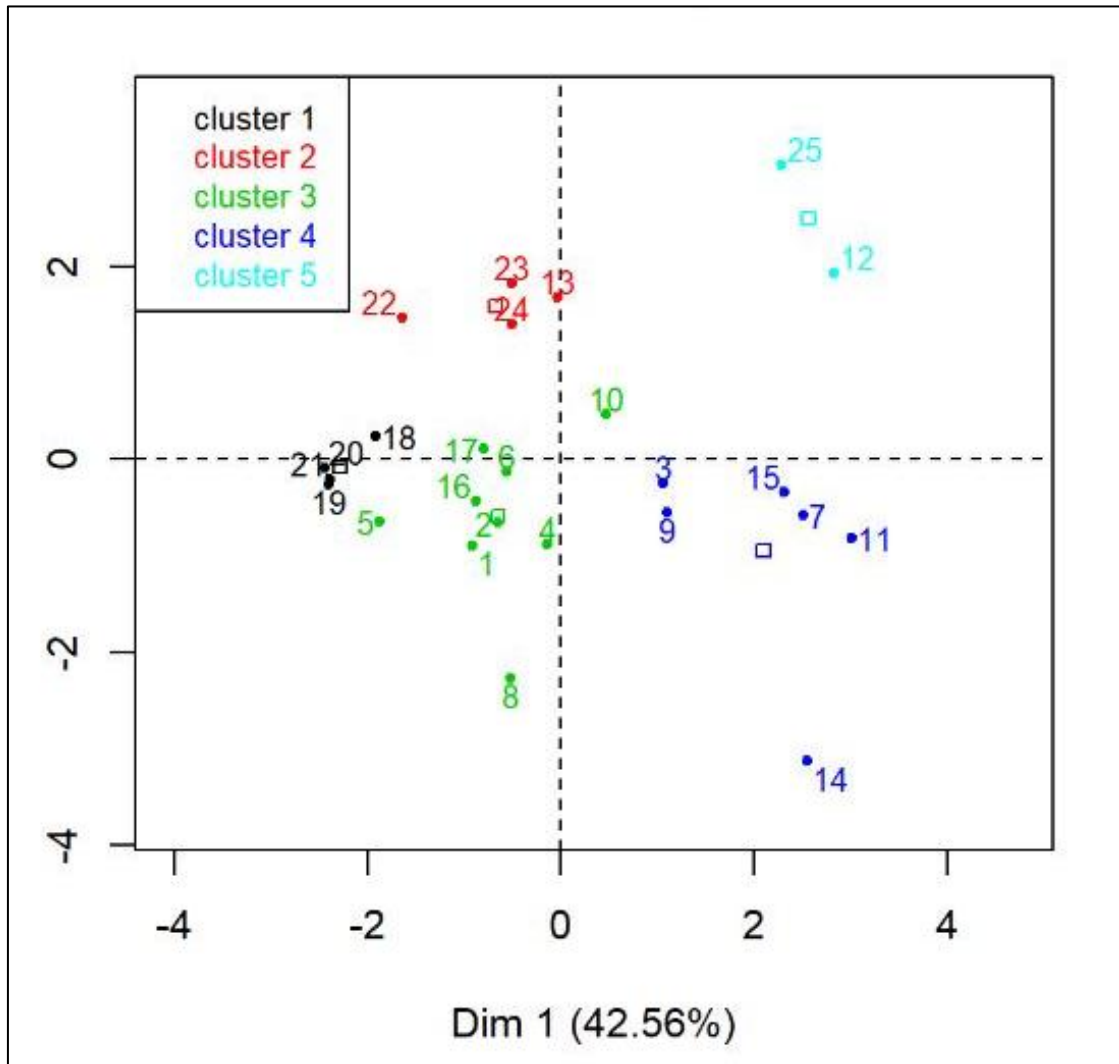


Figura 6-6 Agrupamiento de los pozos mediante clusters

De las salidas proporcionadas por el paquete FactoMineR, y de las figuras anteriores se realiza la siguiente caracterización de los *clusters*:

1. *Cluster 1*: La litología característica de este grupo son las gravas. Se caracteriza por tener altos valores de *Caudal*. Las variables *Tope Observado* y *Profundidad de perforación* muestran valores menores al promedio global. Está conformado exclusivamente por perforaciones en gravas ubicadas contiguas al cauce del río Colorado en cercanías de la ciudad de Rincón de los Sauces. Esto se debe a que el acuífero explotado pertenece al subálveo del río y es alimentado por este.
2. *Cluster 2*: Formado por gravas y areniscas intercaladas con gruesos de ambientes fluvio-glaciales. Los valores altos de *Resistividad* se pueden explicar ya que los sedimentos

-
- en estos tipos de depósitos se caracterizan por una mala selección de granos y baja esfericidad, haciendo que la *Resistividad* de las rocas sea mayor.
3. *Cluster 3*: La litología característica son las areniscas intercaladas con finos. Se caracteriza por tener las medias de *Espesor Observado*, *Resistividad* y *Espesor Esperado* por debajo de las medias globales. También se aprecia que el *Espesor Observado* es mayor que el *Espesor Esperado*. De este grupo, el 66% de las perforaciones presentan dificultades al momento de definir la profundidad y espesor del acuífero como así también de la litología perforada.
 4. *Cluster 4*: Se caracteriza porque tiene las medias de las variables *Espesores Observados*, *Tope Esperado* y *Espesor Esperado* mayor a la media general conformado por areniscas intercalados con finos, areniscas y principalmente areniscas con gruesos. Esta característica propia de este grupo se puede aducir a que en el 50% de estas perforaciones no se pudo identificar correctamente el acuífero o estos presentaban bajos niveles de transmisibilidad y se tomó la decisión de ranurar los caños del pozo en su totalidad o en su gran mayoría.
 5. *Cluster 5*: Lo forma una perforación de gravas y otra de areniscas gruesas. Son perforaciones cuyo acuífero explotado se encuentra a mayor profundidad.

La variable litología que se introdujo en el ACP como variable cualitativa suplementaria, resultó con una significativa asociación con los *clusters* propuestos. Sin embargo, cabe aclarar que los *cluster 2, 4 y 5* no están asociados a ninguna de las categorías descriptas de la variable litología.

7. Conclusiones y recomendaciones

De los resultados obtenidos al realizar la evaluación de los SEV en la prospección de agua subterránea, se concluye que:

1. El 80% de las perforaciones propuestas mediante SEV fueron exitosas al hallar agua.
2. A excepción de un pozo, en el resto de las perforaciones se encontraron uno o más errores descritos por este estudio. La principal causa de los errores encontrados, obedecería a que la interpretación de los SEV se realiza con modelos geológicos que no representan fidedignamente el subsuelo. Esto sucede porque se modelan con escasa información geológica de subsuelo y/o se realiza una mala interpretación de la información disponible.
3. Del análisis ACP de las variables, se observa una relación directa significativa entre las variables *Tope Esperado* y *Tope Observado*. Las variables *Espesor Esperado* y *Espesor Observado* tienen una relación lineal directa más débil. Este comportamiento se puede explicar según lo expuesto en el punto anterior.
4. La *Resistividad* está fuertemente ligada al segundo eje factorial y sobre este se proyectan en orden ascendente las distintas litologías según su granulometría. Esto indica que el método SEV es eficiente para distinguir las litologías estudiadas.
5. En líneas generales, el Sondeo Eléctrico Vertical como herramienta de prospección de aguas subterráneas en la provincia de Neuquén es una aplicación útil solamente si se interpretan las mediciones de campo bajo un modelo de subsuelo fiable. De lo contrario, la ambigüedad propia del método, hace que los objetivos buscados en las perforaciones no se encuentren a la profundidad estimada en el SEV o simplemente no existan.

Por lo expuesto anteriormente se proponen las siguientes recomendaciones para organizaciones públicas y privadas:

1. Realizar estudios SEV si se dispone de buena información geológica, tanto de subsuelo como de afloramientos, para garantizar un resultado adecuado.
2. Las empresas estatales y organismos públicos deberían estandarizar los informes de SEV, haciendo hincapié en el objetivo a perforar. Además, el control geológico de las perforaciones debería ser lo más detallado posible, especificando tipo de roca, color, tamaño del grano, forma del grano, clasificación y cementación.
3. Es necesario contar con una base de datos de subsuelo en formato digital y georreferenciada que recopile los estudios realizados y que sirva de base para nuevos

estudios. Ésta se tiene que actualizar periódicamente y sería ideal que esté disponible para todos los usuarios en pos de mejorar el modelo geológico de subsuelo y con ello las interpretaciones del SEV.

4. Es deseable que se continúe desarrollando la Tabla de Resistividades elaborada en este estudio, incorporando información nueva, tanto de SEV y de pozos y sumando nuevas categorías de litologías.

8. Bibliografía

- Alile, M. O., Jegede, S. I., & Ehigiator, O. M. (2008). Underground water exploration using electrical resistivity method in Edo State, Nigeria. *Asian J. Earth Sci*, 1(1), 38-42.
- Ariyo, S. O., & Adeyemi, G. O. (2009). Role of electrical resistivity method for groundwater exploration in hard rock areas: a case study from Fidiwo/Ajebo areas of Southwestern Nigeria. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 10(1), 483-486.
- Arshad, M., Cheema, J. M., & Ahmed, S. H. A. F. I. Q. U. E. (2007). Determination of lithology and groundwater quality using electrical resistivity survey. *International Journal of Agriculture and Biology*, 9(1), 143-146.
- Caicedo, D., Tálamo, E. & Vilches, F.E. 2016. Exploración geoelectrica para la caracterización hidrogeológica en la zona sur de la Sierra de Chepes, La Rioja. *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. Relatorio 95-102 pp. Catamarca, Argentina.
- Calvetty Amboni, B. & Bianchi, E.H. 2016. Prospección Geoelectrica en la Cuenca de Gastre. *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. Relatorio 45-53 pp. Catamarca, Argentina.
- Colombino, J. & Luengo, M. (2011). Regiones Hidrogeológicas. In *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Relatorio 18º Congreso Geológico Argentino, Neuquén* (pp. 833-840).
- Dam, J. C. and Meulenkaamp, J. J. (1967), Some results of the geo-electrical resistivity method in ground water investigations in the Netherlands. *Geophysical Prospecting*, 15: 92-115
- Davis, J. C. (2002). *Statistics and data analysis in geology – 3rd ed.* Willey & Sons, New York.
- Ekwe, A. C., Onu, N. N., & Onuoha, K. M. (2006). Estimation of aquifer hydraulic characteristics from electrical sounding data: the case of middle Imo River basin aquifers, south-eastern Nigeria. *Journal of spatial hydrology*, 6(2).
- Ernstson, K., & Kirsch, R. (2006). *Groundwater Geophysics a tool for hydrogeology*.
- Ferrer J. A., Irisarri J. A. y Mendia J. M., 1990. Estudio Regional de Suelos de la Provincia del Neuquén. Secretaría de Estado del COPADE, CFI, (v1 - ii y iii), (viii1). Bs. As.

-
- Hidroar S.A. 2011. Estudio Hidrogeológico para abastecimiento de agua a Rincón de los Sauces-Neuquén. Inédito. 30 pp.
 - Husson F., Le Dien S., Page`s J. Confidence ellipse for the sensory profiles obtained by principal component analysis. *Food Qual. Prefer.* 2005; 16: 245–250.
 - Husson, F., Lê, S., & Pagès, J. (2013). *Análisis de datos con R*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
 - Korte, G. B., & Korte, G. 2001. *The GIS book*. Cengage Learning.
 - Lê, S., Josse, J. & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software.* 25(1). pp. 1-18.
 - Mulholland, D. S., de Sousa Ferreira, M. M., Walde, D. H. G., & Boaventura, G. R. (2015). Influencias Geológicas y Antrópicas en la Calidad de las Aguas Subterráneas Localizadas al Sur de Brasilia (DF), Brasil. *Geociencias Aplicadas Latinoamericanas*, 2(1), 11-21.
 - Orellana, E. (1972). Prospección geoeléctrica en corriente continua.
 - Pagès, J. (2014). *Multiple factor analysis by example using R*. Chapman and Hall/CRC.
 - Perdomo, S. (2009). Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica (Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas).
 - Pereyra F.X., Irisarri J.A. y Ferrer J.A. (2011). Suelos: Factores de formación, procesos pedogenéticos y distribución. *Relatorio del XVIII Congreso Geológico Argentino*, 871 – 880.
 - R Core Team (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
 - Ramos, V. A. (1999). Las provincias geológicas del territorio argentino. *Geología Argentina*, 29(3), 41-96.
 - Ramos, V. A., & Folguera, A. (2005). Los Andes Australes: Una evolución tectónica excepcional entre el sur de Mendoza y el norte de Neuquén. In *Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos*, Actas (archivos electrónicos).
 - Ramos, V. A., Folguera, A., & García Morabito, E. (2011). Las provincias geológicas del Neuquén. In *Geología y Recursos Naturales de la Provincia del Neuquén. Relatorio 18º Congreso Geológico Argentino, Neuquén* (pp. 317-326).
 - Ramos, V.A. (2000) Las provincias geológicas del territorio argentino. En: Caminos, R. (Ed.): *Geología Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29(3): 41-96. Buenos Aires.

-
- Rencher, A. C. (2003). *Methods of multivariate analysis* (Vol. 492). John Wiley & Sons.
 - Resolución A/RES/64/292. Asamblea General de las Naciones Unidas. Julio de 2010
 - Rodríguez, M. F., Leanza, H. A., Arregui, C., Carbone, O., Danieli, J. C., & Vallés, J. (2011). El Grupo Malargüe (Cretácico Tardío-Paleógeno temprano) en la Cuenca Neuquina. In Relatorio del 18 Congreso Geológico Argentino (pp. 245-264).
 - Roller, E.O. (1976) Sistema de San Bárbara. 6° Congreso Geológico Argentino, Actas 1: 240-255. Buenos Aires.
 - Serres, Y. F. (1969). Resistivity prospecting in a United Nations groundwater project of Western Argentina. *Geophysical Prospecting*, 17(4), 449-467.
 - Sikandar, P., Bakhsh, A., Arshad, M., & Rana, T. (2010). The use of vertical electrical sounding resistivity method for the location of low salinity groundwater for irrigation in Chaj and Rachna Doabs. *Environmental Earth Sciences*, 60(5), 1113-1129.
 - Tunik, M., Folguera, A., Naipauer, M., Pimentel, M., & Ramos, V. A. (2010). Early uplift and orogenic deformation in the Neuquén Basin: constraints on the Andean uplift from U–Pb and Hf isotopic data of detrital zircons. *Tectonophysics*, 489(1-4), 258-273.
 - Turner, J.C.M. 1965. Estratigrafía de Aluminé y adyacencias (provincia del Neuquén). *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 20(2): 153-184.
 - Universidad Nacional del Sur. 2002. Estudio para la explotación racional del agua subterránea y la detección y control de la contaminación del acuífero que abastece a la ciudad de Zapala, provincia del Neuquén. Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. Departamento de Geología. Cátedra de Hidrogeología. Informe inédito. 94 pp.
 - Van Dam, J. C., & Meulenkaamp, J. J. (1967). Some results of the geo-electrical resistivity method in ground water investigations in the Netherlands. *Geophysical Prospecting*, 15(1), 92-115.
 - Víctor, O. 2011. Sistemas de Información Geográfica. *Libro SIG*.
 - Zohdy, A. A., Eaton, G. P., & Mabey, D. R. (1974). Application of surface geophysics to ground-water investigations.
 - Zunino, E., & Ainchil, J. (2000). Evaluación geofísica del Acuífero Guaraní en la Argentina. *Águas Subterráneas*.
 - Zunino, E., & Ainchil, J. (2000). Evaluación geofísica del Acuífero Guaraní en la Argentina. *Aguas Subterráneas*.

ANEXO

Salidas del Análisis de Componentes Principales

Matriz de Dispersión

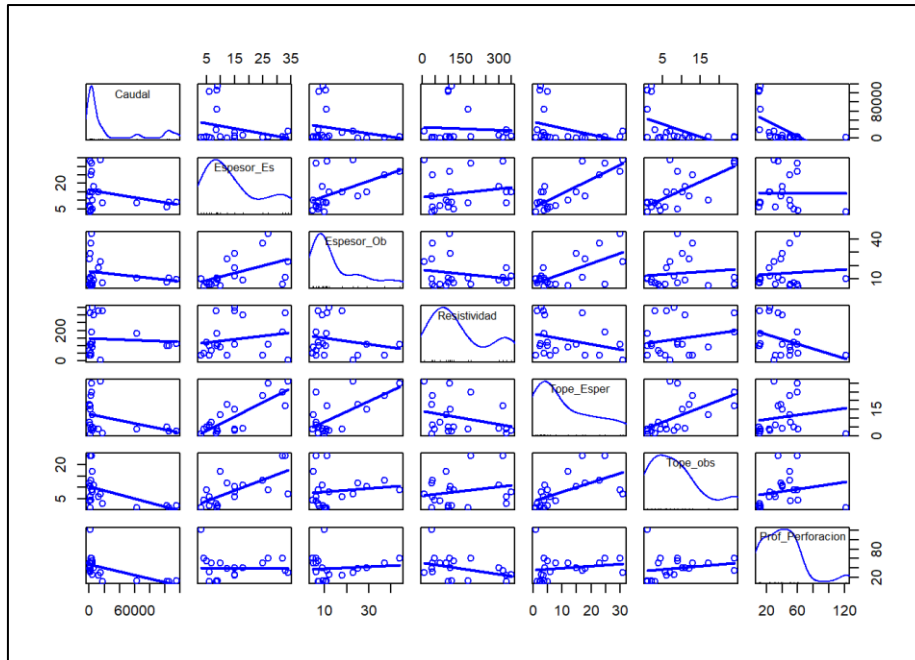


Figura A

Autovalores

	Autovalor	Porcentaje de variancia	Porcentaje acumulado de variancia
Comp 1	2.97	42.558	42.56
Comp 2	1.70	24.382	66.94
Comp 3	1.14	16.341	83.28
Comp 4	0.62	8.869	92.15
Comp 5	0.34	4.988	97.14
Comp 6	0.16	2.328	99.47
Comp 7	0.03	0.534	100

Tabla A

Salidas ACP vinculadas a las variables

Autovectores (coordenadas)

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Tope_Esper	0,91355	-0,16008	0,31748	-0,12101	-0,03509
Tope_Obs	0.67975	0.57447	-0.17090	-0.30709	0,13034
Espesor_Esp	0.80736	0.41059	-0.17090	-0.30709	0,06366
Espesor_Obs	0.64471	-0.45953	0.37180	0.43640	-0,10054
Resistividad	-0.07482	0.82737	-0.05452	0.54083	0,10467
Caudal	-0.59885	-0.07949	0.68944	-0.07775	0,3882
Prof_Perf	0.50071	-0.52962	-0.53833	0.14314	0,39382

Tabla B

Correlaciones variables con ejes

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Tope_Esper	0.91355	-0.16008	0.31748	-0.12101	-0.03509
Tope_Obs	0.67975	0.57447	-0,1709	-0.30709	0.13034
Espesor_Esp	0.80736	0.41059	0.32794	-0.04933	0.06366
Espesor_Obs	0.64471	-0.45953	0.37180	0.43640	-0.10054
Resistividad	-0.07482	0.82737	-0.05452	0.54083	0.10467
Caudal	-0.59885	-0.07949	0.68944	-0.07775	0.38820
Prof_Perf	0.50071	-0.52962	-0.53833	0.14314	0.39382

Tabla C

Calidad de representación (Cosenos cuadrados)

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Tope_Esper	0.834571	0.025626	0.100796	0.014643	0.001232
Tope_Obs	0.462060	0.330016	0.029208	0.094305	0.016989
Espesor_Esp	0.651830	0.168587	0.107544	0.002433	0.004052
Espesor_Obs	0.415648	0.168587	0.138237	0.190444	0.010109
Resistividad	0.005599	0.684538	0.002972	0.292495	0.010956
Caudal	0.358618	0.006318	0.475323	0.006045	0.150695
Prof_Perf	0.250706	0.280502	0.289801	0.020489	0.155095

Tabla D

Contribuciones

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Tope_Esper	28,0149	1,5014	8,8117	2,3585	0,3527
Tope_Obs	15,5104	19,3359	2,5534	15,1896	4,8660
Espesor_Esp	21,8806	9,8777	9,4017	0,3919	1,1607
Espesor_Obs	13,9524	12,3724	12,0849	30,6746	2,8955
Resistividad	0,1879	40,1076	0,2598	47,1117	3,1380
Caudal	12,0381	0,3702	41,5535	0,9737	43,1635
Prof_Perf	8,4157	16,4348	25,3349	3,3001	44,4236

Tabla E

Descripción automática de la dimensión

\$Dim.1		
\$Dim.1\$quanti		
	correlation	p.value
Tope_Esper	0,91	0
Espesor_Es	0,81	0
Tope_obs	0,68	0
Espesor_Ob	0,64	0
Prof_Perforacion	0,5	0,01
Caudal	-0,6	0
\$Dim.1\$category		
	Estimate	p.value
Gravas	-1,2	0,02
\$Dim.2		
\$Dim.2\$quanti		
	correlation	p.value
Resistividad	0,83	0
Tope_obs	0,57	0
Espesor_Esp	0,41	0,04
Espesor_Obs	-0,46	0,02
Prof_Perf	-0,53	0,01
\$Dim.2\$quali		
R2 p.value		
Litologia	0,41	0,01
\$Dim.2\$category		
	Estimate	p.value

Gravas	1,08	0,02
Areniscas finas	-1,25	0

\$Dim.3

\$Dim.3\$quanti

	correlation	p.value
Caudal	0,69	0
Prof_Perforacion	-0,54	0,01

\$Dim.3\$category

	Estimate	p.value
Gravas	0,78	0,04

Tabla F