



## Análisis de favorabilidad hidrogeológica mediante el Proceso de Jerarquía Analítica y SIG en el Municipio de San Juan de Limay, Estelí, Nicaragua.

Analysis of hydrogeological favorability through the Analytical Hierarchy Process and GIS in the Municipality of San Juan de Limay, Estelí, Nicaragua.

Aguilar Zeledón, Belkys<sup>1</sup> ✉; Calderón, Heyddy<sup>2</sup>

1. Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO), Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua (UNAN-Managua), Rotonda Universitaria Rigoberto López Pérez, 200 mts al Este.
2. Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA), Km 12,5 Carretera Norte, Managua.

Recibido: 13/07/2023  
Aceptado: 04/08/2023  
© 2021-Revista Tierra (Earth Journal) IGG-CIGEO



Este trabajo está licenciado bajo una [Licencia Internacional Creative Commons 4.0 Atribución-NoComercial-CompartirIgual](#).

### Resumen

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos e indispensables (Rahmati et al., 2015). El agua subterránea es la parte principal del suministro de agua en regiones con problemas de sequía. A medida que crece la demanda de agua en San Juan de Limay, crece la necesidad de conocer el potencial de aguas subterráneas en la zona. Esta investigación tuvo como objetivo principal delimitar zonas con favorabilidad hidrogeológica en el municipio de San Juan de Limay, mediante el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) basado en el conocimiento y opinión de expertos, utilizando un modelo de sistema de información geográfica (SIG). El principal objetivo de la metodología AHP es apoyar a los tomadores de decisiones en la selección de la mejor alternativa para la aplicación de métodos futuros o pozos de exploración de aguas subterráneas, utilizándose como una herramienta sencilla para la evaluación de favorabilidad hidrogeológica en zonas con escasez de datos, ahorrando tiempo y costos. La integración de las capas temáticas señala que la geología, calidad del agua, topografía, textura del suelo, lineamientos y drenaje juegan un papel crucial en la delimitación de zonas con favorabilidad hidrogeológica, brindando como resultado un mapa clasificado en 5 clases: Favorabilidad Muy Alta, Favorabilidad Alta, Favorabilidad Moderada, Poca Favorabilidad y No Favorable. Los resultados que emanan de este estudio pionero realizado en el municipio de Limay se pueden utilizar para conocer la disponibilidad los recursos de agua subterránea y encontrar sitios adecuados para exploración de aguas subterráneas.

**Palabras Claves:** Favorabilidad hidrogeológica, Proceso Jerárquico Analítico (AHP), aguas subterráneas, acuíferos fracturados, Corredor Seco de Nicaragua.

### 1. INTRODUCCIÓN

Nicaragua es un país especialmente privilegiado en cuanto a recursos hídricos. A pesar de ello, la contaminación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos ha tenido un gran impacto en la disponibilidad, debido a variaciones espaciales y temporales en su distribución (FAO, 2007). Según (Rahmati et al., 2015), el agua es uno de los recursos naturales más valiosos e indispensables. El agua subterránea es la parte principal del suministro de agua en regiones con problemas de sequía. El presente trabajo investigativo se localiza en el municipio de San Juan de Limay, departamento de Estelí, donde la ocurrencia de aguas superficiales se da efímeramente y las sequías son recurrentes; es por ello relevante tener conocimiento sobre los recursos existentes de aguas subterráneas, especialmente durante el déficit hídrico en períodos de sequía.

La investigación tiene como objetivo realizar un análisis hidrogeológico mediante un mapa de favorabilidad, con el propósito de delimitar zonas con potencial hidrogeológico. Desde el punto de vista de la exploración de aguas subterráneas, el término favorabilidad o potencial de aguas subterráneas se puede definir como la posibilidad de presencia de agua subterránea en un área, permitiendo la eficiencia de la exploración de este recurso (Bernardes et al., 2017; Rahmati et al., 2015). Es de suma importancia realizar un análisis para optimizar la elección de sitios para estudios detallados, que implican una inversión económica importante y

✉ belkyslorena18@gmail.com

### Abstract

Water is one of the most valuable and indispensable natural resources (Rahmati et al., 2015). Groundwater being the main part of the water supply in regions with drought problems. As the demand for water in San Juan de Limay grows, the need to know the potential of groundwater in the area grows. The main objective of this research was to delimit areas with hydrogeological favorability in the municipality of San Juan de Limay, through the Hierarchical Analysis Process (AHP) based on the knowledge and opinion of experts using a geographic information system (GIS) model. The main objective of the AHP methodology is to support decision makers in the selection of the best alternative for the application of future methods or groundwater exploration wells, being used as a simple tool for the evaluation of hydrogeological favorability. This methodology can be applied in regions with scarce data, saving time and costs. The integration of the thematic layers indicated that geology, water quality, topography, soil texture, guidelines and drainage play a crucial role in delimiting areas with hydrogeological favorability, resulting in a map classified into 5 classes: Very high favorability, High Favorability, Moderate Favorability, Low Favorability and Not Favorable. This pioneering study in the municipality of Limay explores baseline data for possible groundwater zones. The results that emanate from this study can be used to know the availability of groundwater resources and find suitable sites for groundwater exploration.

**Keywords:** Hydrogeological favorability, Analytic Hierarchy Process (AHP), groundwater, fractured aquifer, Nicaragua's Dry Corridor.

la ubicación de futuras perforaciones, que ayuden a contribuir a generar e intercambiar información relacionada con el potencial hídrico de San Juan de Limay, y apoyar al desarrollo económico y aumento de la resiliencia ante eventos climáticos.

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de San Juan de Limay está situado en el departamento de Estelí, este último ubicado en la Región de la Zona Norte del país. Hidrográficamente se localiza en la unidad hidrográfica de El Pacífico (9533), de la cual se subdivide la unidad hidrográfica (Río Negro, 9533762), con una longitud de 77 km (INETER et al., 2014). La unidad Río Negro se subdivide en dos unidades a nivel 8 (95337629) y (95337627), localizadas en el municipio de San Juan de Limay.

#### 2.2. METODOLOGÍA

Para la obtención de las zonas con favorabilidad hidrogeológicas se utilizaron técnicas geoespaciales, teniendo de base 6 capas temáticas ordenadas jerárquicamente de mayor a menor influencia en los resultados: litología, concentraciones de arsénico, índice de posición topográfica, densidad de lineamiento, densidad de drenaje y capacidad de infiltración de los tipos de suelos (Figura 2). a) Unidades hidrográficas nivel 4, b) Unidad Hidrográfica del Pacífico (9533) como parte de esta unidad se encuentra la unidad Río Negro (9533762); c) Unidades Hidrográficas nivel 8 (95337629 y 95337627), municipio San Juan de Limay.

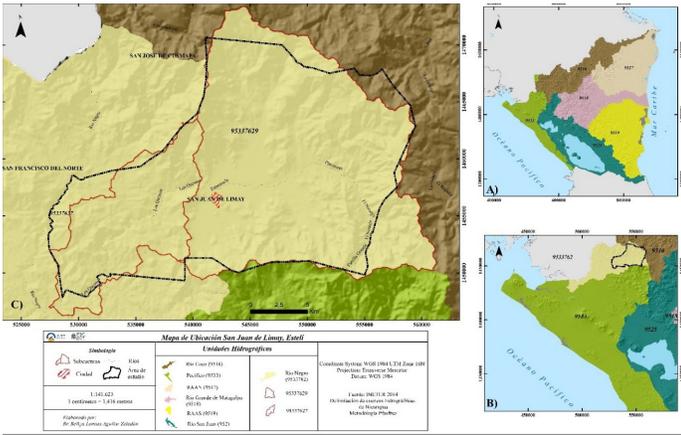


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio

### 2.3. Litología

El entorno geológico juega un papel vital en la ocurrencia y distribución de aguas subterráneas, influyendo en la porosidad como en la permeabilidad. La capa de litología se preparó digitalizando las hojas geológicas, a escala 1: 50,000. Hoja 2855-I San Juan de Limay, Hoja 2855-II Achuapa, Hoja 2955-III Estelí y la Hoja 2955-IV La Sirena. Catastro e Inventario de Recursos Naturales, Managua, 1971).

La geología del área fue reclasificada en subclases de acuerdo con la metodología AHP, asignándole los pesos más bajos a los materiales volcánicos terciarios masivos, debido a que se consideran inadecuadas para la infiltración de agua al acuífero, por la poca permeabilidad y la baja capacidad de transmitir agua (Tabla 1).

La formación Cuaternaria está constituida por sedimentos aluviales, con intercalación de rodados volcánicos, los cuales presentan una mayor permeabilidad y son más favorables para el almacenamiento de aguas subterráneas, por ello se les asignó un peso más alto.

### 2.4. Concentraciones de arsénico

Conocer las concentraciones de arsénico en el área es una base importante para determinar si el agua está dentro de los parámetros admisibles para uso y consumo. En esta investigación se le asignó un mayor peso a las zonas que presentaron concentraciones en rangos admisibles para consumo que van desde 0 µg/L hasta 5 µg/L, siendo las zonas con mayores concentraciones de arsénico las que poseen pesos menores.

### 2.5. Índice de Posición Topográfica (TPI)

El índice de posición topográfica permitió una clasificación del terreno basado en la escala de Weiss. El análisis del modelo Digital de Elevación ayudó a obtener el mapa basado en el TPI clasificando las zonas en: Cimas, Pendientes pronunciadas, Pendiente media, Pendiente suave, Planicies y Valles. Se asignaron mayores pesos a las zonas con relieves planos, valles y pendientes medias debido a que favorecen el proceso de infiltración y recarga hídrica, al permitir un mayor período de tiempo de estadia del agua en el suelo.

Por otra parte, las zonas con pendientes fuertes y pronunciadas aumentan la velocidad y cantidad de escorrentía superficial lo que influye en la capacidad de recarga hídrica, asignándoles un peso bajo ya que se asume no favorable.

### 2.6. Textura de suelo/Capacidad de infiltración

La textura del suelo es un factor determinante en la cantidad de agua que pueda infiltrarse o influir en la recarga hídrica. Los diferentes tipos de suelo suelen poseer una permeabilidad de suelo diversa, que depende en gran medida de la textura del suelo, su estructura y la cobertura del suelo en el área (Ponnusamy, 2020).

Los tipos de texturas presentes en el área son: franco arenoso (grosso), franco arenoso limoso (medio), franco arcilloso (fino), materiales arcillosos muy finos y basamento rocoso. La textura más gruesa con intercalaciones de arena, grava y limo se consideró la más adecuada asignándole el mayor peso, mientras que suelos arcillosos y compactos (basamento rocoso) debido a que tienen menor capacidad de infiltración se les asignó un menor peso (Mapa 7).

### 2.7. Densidad de Lineamientos

Los lineamientos se pueden describir como estructuras o entidades lineales o curvilíneas en la superficie de la tierra y son indicadores de zonas más débiles del basamento rocoso. Los lineamientos representan las zonas de fallas y fracturas que dan como resultado una mayor porosidad y permeabilidad secundaria. Juegan un papel fundamental en el potencial de las aguas subterráneas, ya que las zonas de alto potencial de aguas subterráneas son seguidas por una alta densidad de lineamientos (Ahmadi et al., 2021).

Se les asignó el peso más alto a las áreas con alta presencia de lineamiento considerándose las más adecuadas, a diferencia de las zonas que no tienen presencia de lineamientos o fallas, consideradas zonas menos favorables por ello se les asignó menor peso.

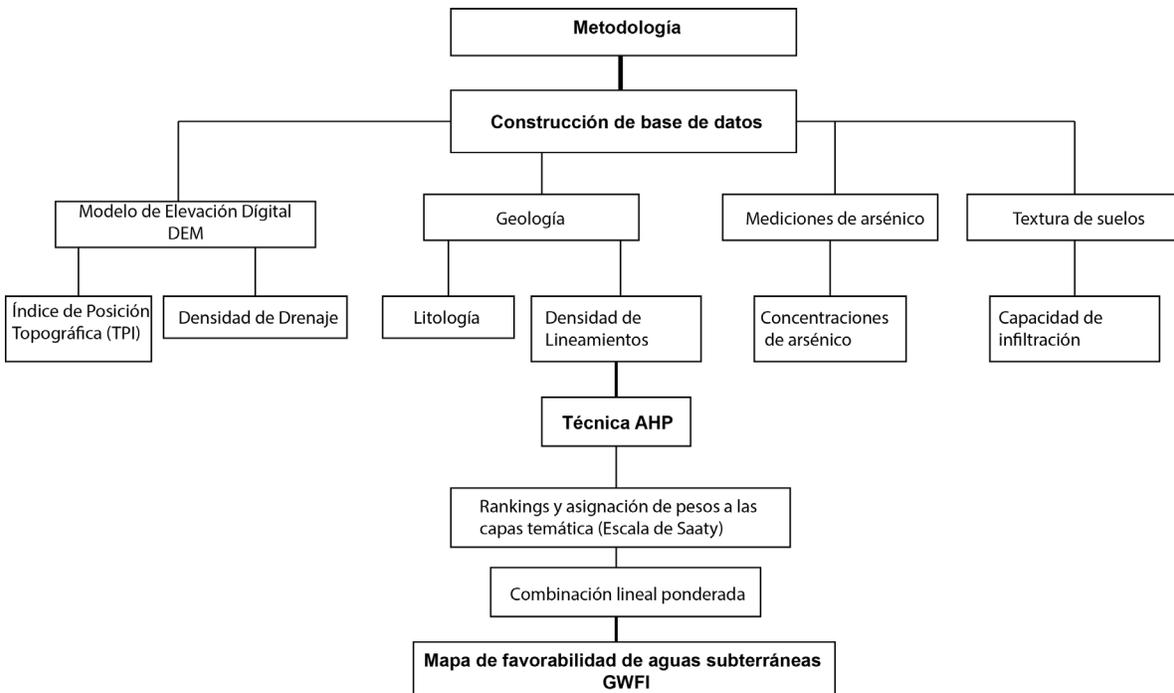


Figura 2. Plan y procesamiento

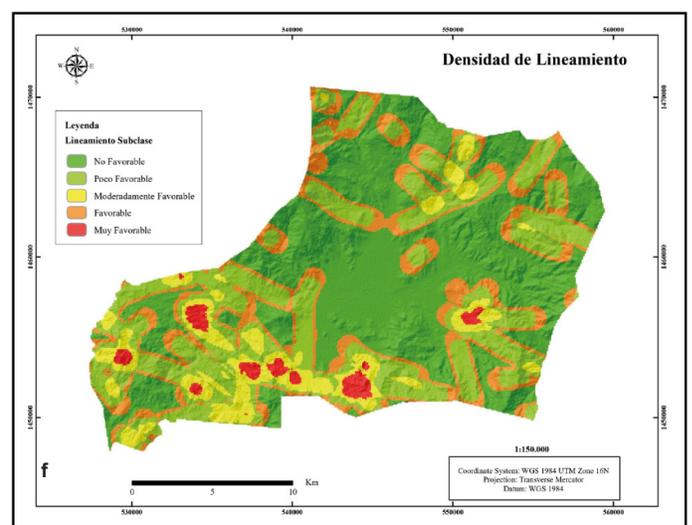
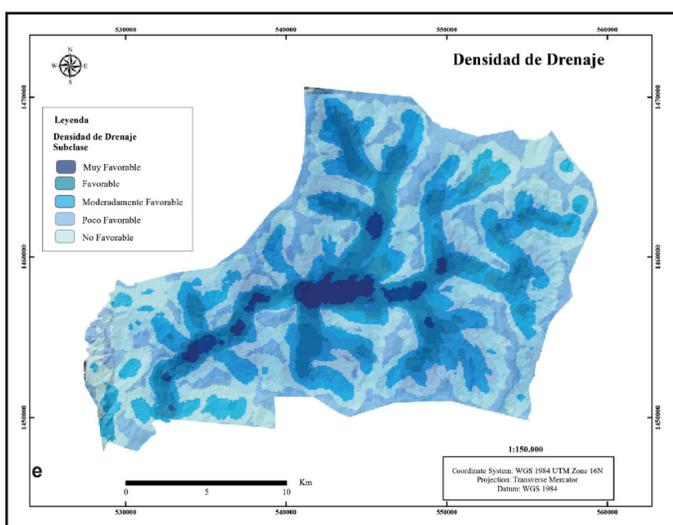
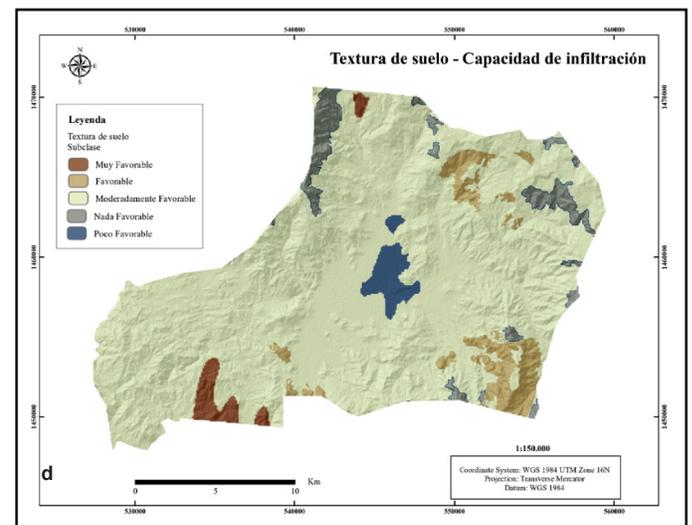
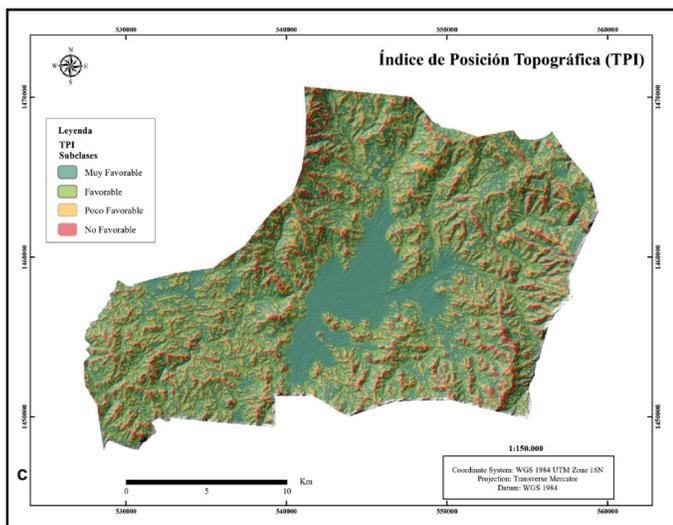
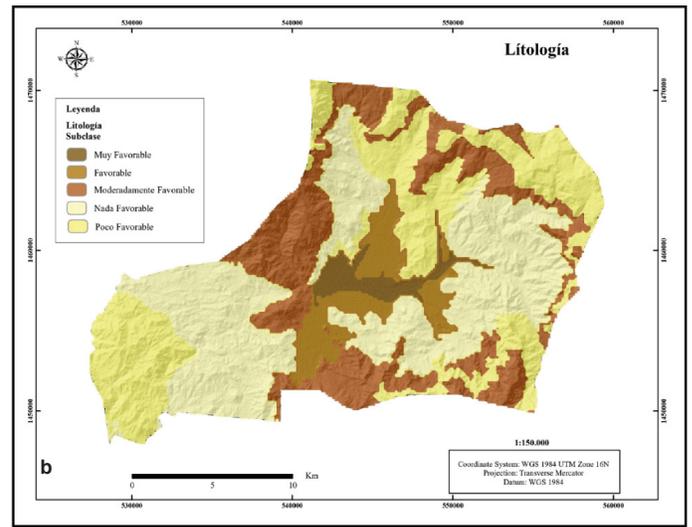
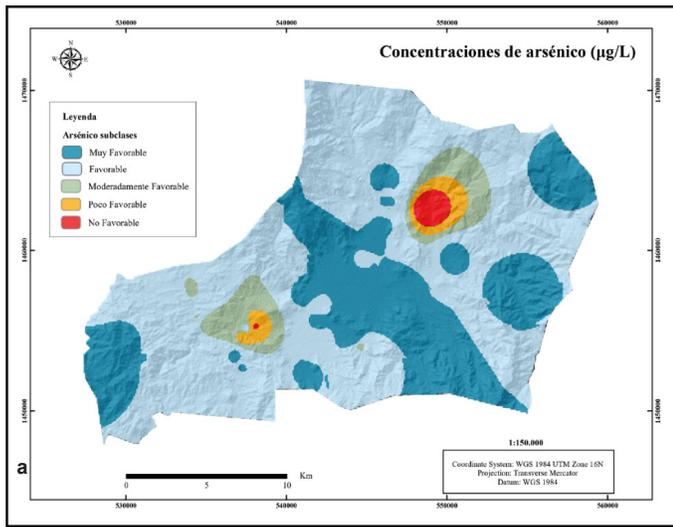


Figura 3. a. Concentraciones de arsénico, b. Litología, c. Índice de Posición Topográfica, d. Textura de suelo, e. Densidad de drenaje, f. Densidad de lineamiento.

### 2.8. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje tiene una influencia significativa en la escorrentía y la infiltración del agua subterránea. El sistema de drenaje de un área está determinado por la naturaleza y la estructura del basamento rocoso, el tipo de vegetación, capacidad de absorción, infiltración de lluvia de los suelos y el gradiente de pendiente del terreno.

El sistema de drenaje del área de estudio se obtuvo a partir del modelo digital de elevaciones DEM, generando los drenajes de la zona de estudio para luego calcular su densidad en km/km2. La densidad de drenaje en el área se reclasificó en cinco zonas; asignándole el peso más alto a densidad alta, debido que en la zona los manantiales alimentan los caudales de los cauces influyendo en la capacidad de los pozos ubicados en la cercanía de los ríos, todo lo contrario de las zonas con poca y baja densidad, considerando que son menos favorables, por ello, se les asigna un peso más bajo.

### 3. PROCESO DE JERARQUÍA ANALÍTICA (AHP)

#### 3.1. Asignación de pesos normalizados

En la aplicación del Análisis de Decisión Multicriterio se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico, lo que nos permite establecer como primer paso los pesos normalizados para cada capa temática. La jerarquía de cada capa se obtuvo mediante la escala de comparación (1-9) establecida por (Saaty, 1980), tomando como base la opinión de expertos (Tabla 1).

Generada la matriz por pares se procede a calcular el peso normalizado (W) para cada una de las capas temáticas como se muestra en la Tabla 2. Para verificar la validez de los pesos normalizados obtenidos fue necesario calcular la relación de consistencia (CR) de acuerdo a la Ecuación 1.

$$CR = CI / RI \tag{1}$$

Donde, RI es el índice aleatorio de consistencia, el cual depende del orden de la matriz, en este caso para el orden n=6, RI= 1,24 (Tabla 3).

Tabla 1. Matriz de comparación por pares para el proceso AHP

Capas temáticas	Litología	D.L	D.D	TPI C.	Inf	As
Litología	1	3	7	3	3	1
Densidad de lineamiento	1/3	1	3	1/7	1/5	1/9
Densidad de drenaje	1/7	1/3	1	1/7	1/7	1/9
TPI	1/3	7	7	1	3	1/3
Capacidad de infiltración	1/3	5	7	1/3	1	1/5
Concentraciones de arsénico	1	9	9	3	5	1
Suma	3.14	25.33	34	7.62	12.34	2.76

Tabla 2. Determinación de los pesos normalizados para cada capa temática

Capa	Litología	D. Lin	D. dre	TPI	C. Inf	As	Suma	W
Litología	0.32	0.12	0.21	0.39	0.24	0.36	1.64	0.27
D. Lin	0.11	0.04	0.09	0.02	0.02	0.04	0.31	0.05
D. dre	0.05	0.01	0.03	0.02	0.01	0.04	0.16	0.03
TPI	0.11	0.28	0.21	0.13	0.24	0.12	1.08	0.18
C. inf	0.11	0.20	0.21	0.04	0.08	0.07	0.71	0.12
As	0.32	0.36	0.26	0.39	0.41	0.36	2.10	0.35
suma	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabla 3. Orden de la matriz RCI

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Valor RCI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48

Tabla 4. Valores de CI y CR

CI	0.13
RCI	1.24
CR	0.10

Tabla 5. Categorías de capas temáticas

Capa temática	Subclase	Ranking	Peso normalizado(W)		
Litología	Aluvial	9	9/45=0.200		
	Indiferenciado	8	8/45=0.178		
	Terraza	8	8/45=0.178		
	Basalto	3	3/45=0.067		
	Dacita	4	4/45=0.089		
	Andesita	2	2/45=0.044		
	Intrusivo	2	2/45=0.044		
	Caliza (agua zarca)	2	2/45=0.044		
	Riolita	3	3/45=0.067		
	Ignimbrita	4	4/45=0.089		
Densidad de Lineamiento		45	1		
	1.168	2	0.083		
	5.169	3	0.125		
	11.526	5	0.208		
	17.320	6	0.250		
	113.911	8	0.333		
Capacidad de infiltración		24	1		
	Franco arenoso (20-25 mm/h)	9	0.310		
	Franco arenoso limoso (15-20 mm/h)	7	0.241		
	Franco arcilloso (5-10 mm/h)	5	0.172		
	Arcillo arenoso (8-10 mm/h)	5	0.172		
	Arcilla pesada (8 mm/h)	2	0.069		
	Basamento rocoso	1	0.034		
		29	1		
	TPI		24	1	
		Cimas	1	0.042	
Pendiente pronunciada		2	0.083		
Planicie		9	0.375		
Pendiente suave valle		3	0.125		
		9	0.375		
		24	1		
Densidad de Drenaje			43,811	7	0.370
			21,390	6	0.300
			14,073	4	0.200
		8,567	2	0.100	
		2,017	1	0.050	
		20	1		
		39	1		
Concentraciones de arsénico		9	0.231		
	0-1	9	0.231		
	1-2	8	0.205		
	2-3	8	0.205		
	3-5	6	0.154		
	5-9	5	0.128		
	9-14	2	0.051		
	14-21	1	0.026		

CI es el índice de consistencia, el cual es dado por:

$$CI = (\lambda \max - n) / (n-1) \tag{2}$$

Siendo  $\lambda \max$  = es el valor propio principal de la matriz y se calculó a partir del cociente

obtenido que en este caso fue 6,63

n= es el número de factores considerados para el análisis de favorabilidad hidrogeológica, el cual es 6.

Se obtuvo: CI= 0,13 y CR= 0,13/1,24= 0,10.

Mediante el resultado de CI, comprobamos que se obtuvo una matriz con pesos consistente.

Se indica que el valor de CR no debe de ser mayor que 0,10 para que los pesos normalizados sean consistentes; de lo contrario, los pesos correspondientes deberían ser verificados para evitar incoherencias (Saaty, 1990).

#### 3.2. Pesos normalizados para las subclases de las capas temáticas

Las categorías de cada capa temática fueron jerarquizadas y se calculó el peso normalizado (ver Tabla 5).

#### 3.3. Índice de Favorabilidad de aguas subterráneas (GWFI)

El índice de favorabilidad o potencial de aguas subterráneas es una cantidad adicional que se utilizó para cuantificar la probabilidad de existencia de agua subterránea en la zona de estudio. A partir de los pesos normalizados, se realiza una combinación lineal ponderada estimando el GWFI de acuerdo con:

$$GWFI = \sum_i^n (XA * YB) \tag{2}$$

Dónde GWFI es el potencial de agua subterránea, X representa el peso de las capas temáticas; Y representa el rango de las subclases de las capas temáticas. El rango A representa el mapa temático y el término B representa las clases de las capas temáticas.

### 3.4. Generación del mapa de favorabilidad hidrogeológica

Todas las capas temáticas fueron procesadas en el modelo de datos Ráster, las cuales fueron reclasificadas con el peso establecido en la matriz, para finalmente calcular el GWFI mediante la superposición o combinación lineal ponderada en ArcGIS.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Hidrogeología

Mediante el análisis de los datos de precipitaciones, evaporaciones y temperaturas medias se realizó un balance hídrico climático para un período de 18 años (2002-2020).

En la Figura 4 se observan las pérdidas en las reservas de agua subterránea, siendo los primeros 4 meses los que presentan mayor déficit en cuanto a precipitación mensual, donde las salidas superan los ingresos de agua al sistema; en los meses centrales del año hidrológico existe una relativa estabilidad en cuanto a los niveles de reservas, que va desde el mes de mayo hasta octubre; en este periodo se han registrado las mayores precipitaciones, en cambio, los meses finales registraron poca precipitación, produciendo un cambio en el almacenamiento.

Los datos tomados muestran que la temperatura media se ha mantenido en promedios similares desde los (23 °C – 27,1 °C), podemos observar un mayor aumento en la temperatura desde enero hasta abril, lo que coincide con ligeros aumentos de temperatura del fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS), es por ello que conlleva la presencia de sequías moderadas (GWP, 2016).

El análisis del balance hídrico climático muestra que existe predominio de las evaporaciones mensuales sobre las precipitaciones mensuales, lo que permite variabilidad y cambio en el almacenamiento subterráneo de las aguas (Figura 6).

### 4.2. Superficie piezométrica y dirección de flujo

De acuerdo con la Figura 6, la carga hidráulica (h) o elevación del nivel agua subterránea en el municipio, con referencia al nivel medio del mar, se encuentra entre los 1400 m hasta los 300 m, ubicándose en el centro y oeste del municipio las cotas más bajas de niveles de aguas.

La dirección del flujo subterráneo va en dirección Noreste-Suroeste, tomando como zona de descarga las planicies y valles, en este caso el Valle de San Juan de Limay.

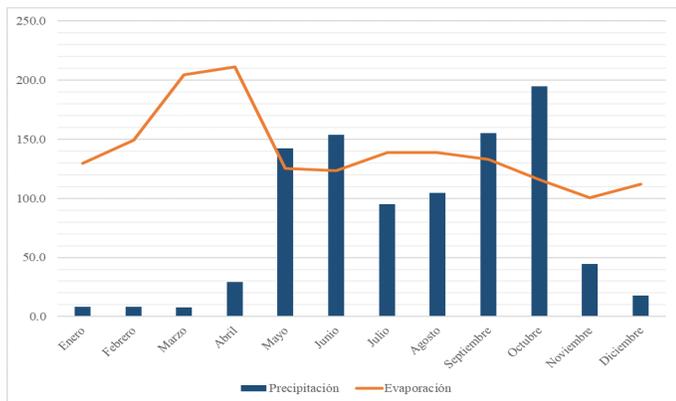


Figura 4. Representación de las variables climáticas en el área

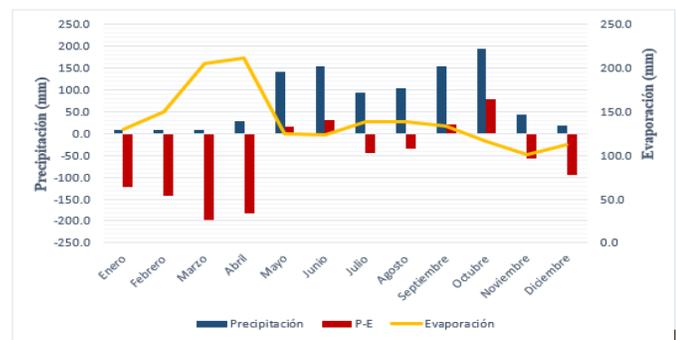


Figura 5. Balance hídrico climático

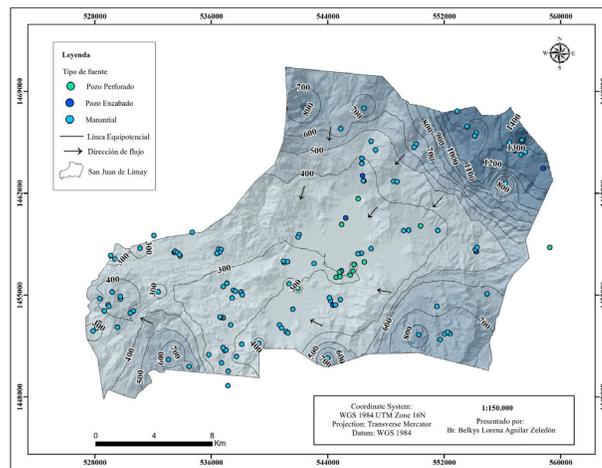


Figura 6. Mapa piezométrico del municipio

### 4.3. Parámetros físico-químicos

#### 4.3.1. Conductividad Eléctrica (CE)

Los rangos varían desde los 386  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el pozo Mateare hasta los 1314  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el pozo ubicado en la Comunidad Redes de Esperanza. Las concentraciones se encuentran fuera del rango admisible por las normas de la legislación nicaragüense, estando arriba de los 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 4.3.2. Sólidos Totales Disueltos (TDS)

Las concentraciones de sólidos totales oscilan en rangos muy cercanos entre 189 mg/l a 651 mg/l, a excepción del pozo La Palma, con una concentración de 1537 mg/l.

#### 4.3.3. pH

El pH oscila en rangos cercanos en la mayoría de pozos, estando estos dentro de los límites recomendados, exceptuando 3 pozos excavados (El Pino, Los Enramados y San Luis) con un pH mayor de 9.

#### 4.3.4. Temperatura (°C)

Se encuentra desde los 21.8 °C hasta los 34.46 °C, con pequeñas variaciones de temperatura en los pozos con menor profundidad.

### 4.4. Concentraciones de arsénico

Se realizaron pruebas in situ de las concentraciones de arsénico en el área y se combinaron con la información de las pruebas realizadas en el municipio por el Centro de Investigaciones de Recursos Acuáticos (CIRA) en el 2012, este nos proporcionó una visión general amplia de la contaminación de las fuentes de agua potable en el área de estudio.

En total se muestrearon 22 pozos, distribuidos en todo el municipio de San Juan de Limay, 17 pozos perforados y 5 excavados. De los 22 pozos muestreados se identificaron 3 fuentes con presencia de concentraciones de arsénico, de los cuales el que presentó mayor concentración fue el pozo excavado en la comunidad La Naranja con 11  $\mu\text{g}/\text{L}$ . Según las normas CAPRE el valor máximo admisible para la ingesta de arsénico es de 10  $\mu\text{g}/\text{L}$ .

### 4.5. Índice de Precipitación Estandarizado (SPI)

El valor del SPI mensual representa la intensidad de la sequía, es decir, que tan grande es el déficit de precipitación. Se utilizaron datos meteorológicos mensuales continuos de la estación Condega, Estelí para estudiar el comportamiento del municipio de San Juan de Limay, Estelí.

Los valores negativos del SPI muestran condiciones de sequía, como se observa en la Figura, el análisis del SPI de 12 meses muestra que los valores extremadamente secos se presentaron desde el 2003 al 2008 con un SPI por debajo de -2, seguida desde el 2009 por niveles de precipitación promedio y luego los niveles bajos de precipitaciones comenzaron nuevamente desde el 2013 al 2016, esta última asociada a anomalías de lluvias durante el período de El Niño de 2015-2016.

El municipio continúa teniendo condiciones de lluvia por debajo de los promedios, con presencia de períodos o escalas cortas de humedad y períodos aún más secos agrupados en escalas de tiempo por lo que se hacen más recurrentes los cambios en los regímenes de precipitación de un año a otro.

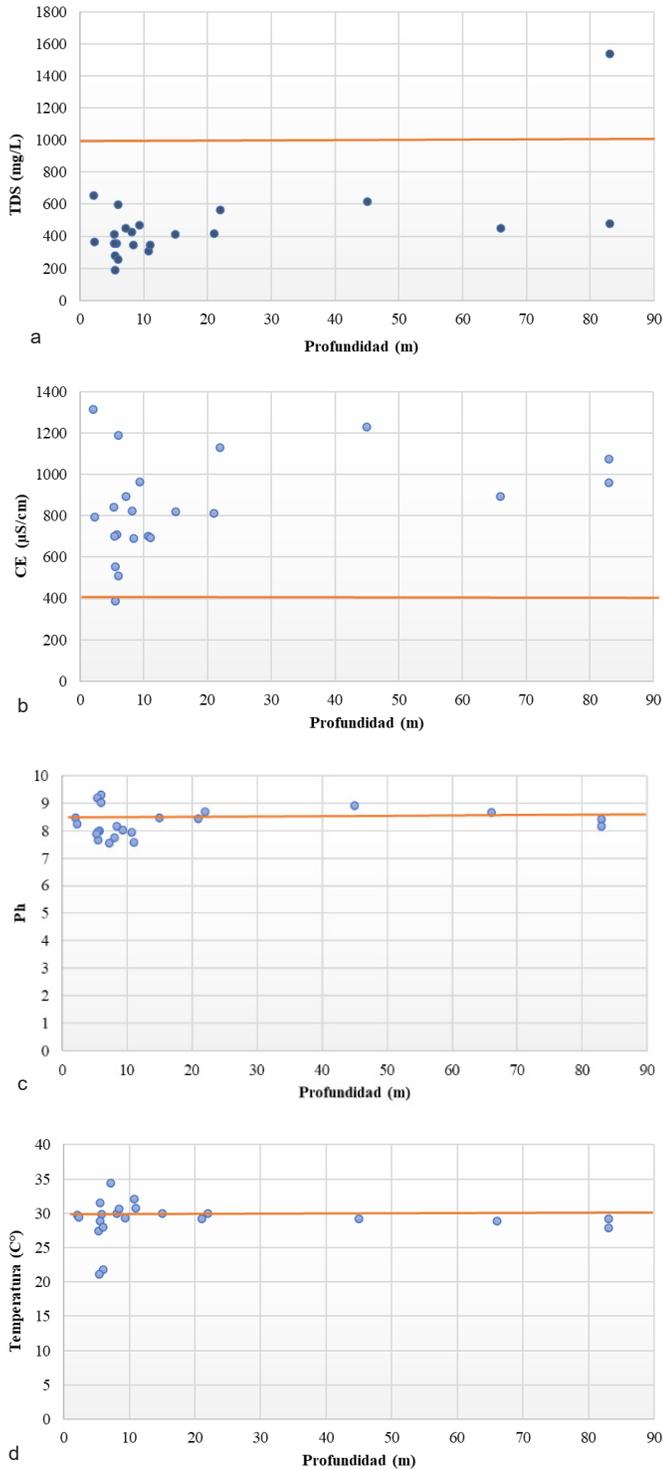


Figura 7. Parámetros físico químicos: a. Conductividad eléctrica (CE), b. Sólidos totales disueltos (TDS), c. pH, d. Temperatura

#### 4.6. Delimitación de zonas hidrogeológicamente favorables

El mapa de favorabilidad hidrogeológica se clasificó en 5 zonas de acuerdo al esquema metodológico, que van desde zonas no favorables, favorabilidad baja, favorabilidad moderada, favorabilidad alta y favorabilidad muy alta (Figura 10).

La superposición de los mapas con el mapa de favorabilidad hidrogeológica encuentra que el área con favorabilidad muy alta comprende parte de los depósitos cuaternarios aluviales, un área sin presencia de arsénico, zonas de valles y planicies y una textura de suelo moderada lo que favorece al potencial de las aguas.

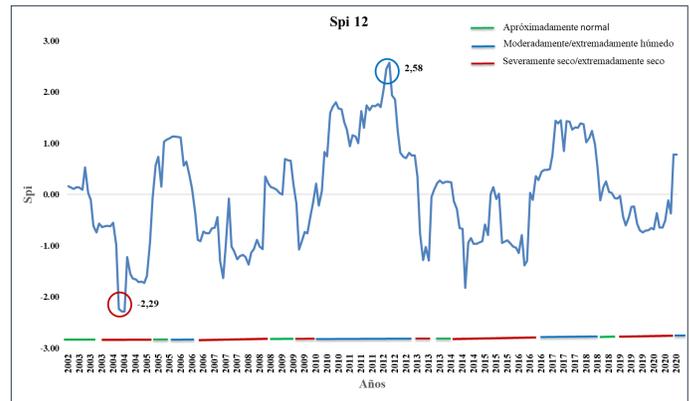


Figura 8. Índice de precipitación estandarizada SPI

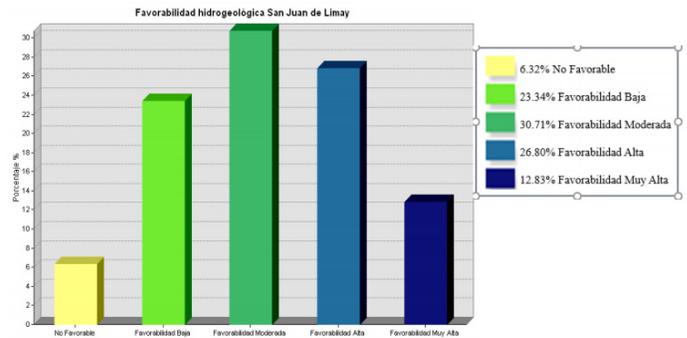


Figura 9. Porcentaje de las zonas con favorabilidad de aguas subterráneas

Zonas con una favorabilidad alta se caracterizan por presencia de materiales volcánicos fracturados que permiten la infiltración y recarga hídrica. Según, Ahmadi et al., (2021), la existencia de fracturas sobre rocas ígneas es eficaz para la recarga de aguas subterráneas

Las zonas con favorabilidad moderada se caracterizan por zonas de pendientes medias y valles, una densidad alta de drenaje y lineamientos y una textura de suelo moderada. Las zonas con favorabilidad moderada tienen una distribución amplia en todo el municipio.

Por último, las zonas con poca favorabilidad o no favorables presentan características topográficas con pendientes pronunciadas, cimas, concentraciones de arsénico fuera de los límites establecidos, basamento rocoso y una baja densidad de lineamiento.

#### 4.7. Favorabilidad Hidrogeológica y Variabilidad Climática

Los resultados observados mediante el índice de precipitación estandarizada (SPI), muestran que casi el 50% del período estudiado abarca años con anomalías negativas, las cuales presentan precipitaciones por debajo del promedio, de tal manera que las zonas consideradas como hidrogeológicamente favorables pueden verse limitadas en cuanto a mecanismos de recarga para los acuíferos por el déficit hídrico que se presenta en temporadas secas

### 5. CONCLUSIONES

El mapa de favorabilidad hidrogeológica para el municipio de San Juan de Limay se obtuvo mediante el enfoque AHP basado en SIG, aplicándolo con éxito para el mapeo de zonas de favorabilidad hidrogeológica, el cual es un mapa de gran relevancia que muestra las zonas más significativas y sitios idóneos para la exploración de aguas subterráneas. Es una herramienta eficiente en la toma de decisiones para la gestión sostenible de los recursos de agua subterránea y la evaluación integral del desarrollo de la exploración de aguas subterráneas para la planificación futura

Los resultados generales concluyen que la metodología AHP junto con la opinión de expertos ayuda a construir un modelo hidrogeológico prospectivo del área, aplicado sobre todo en regiones con escasez de datos, lo que permite reducir tiempo, costos y minimizando así, el riesgo de pozos mal ubicados.

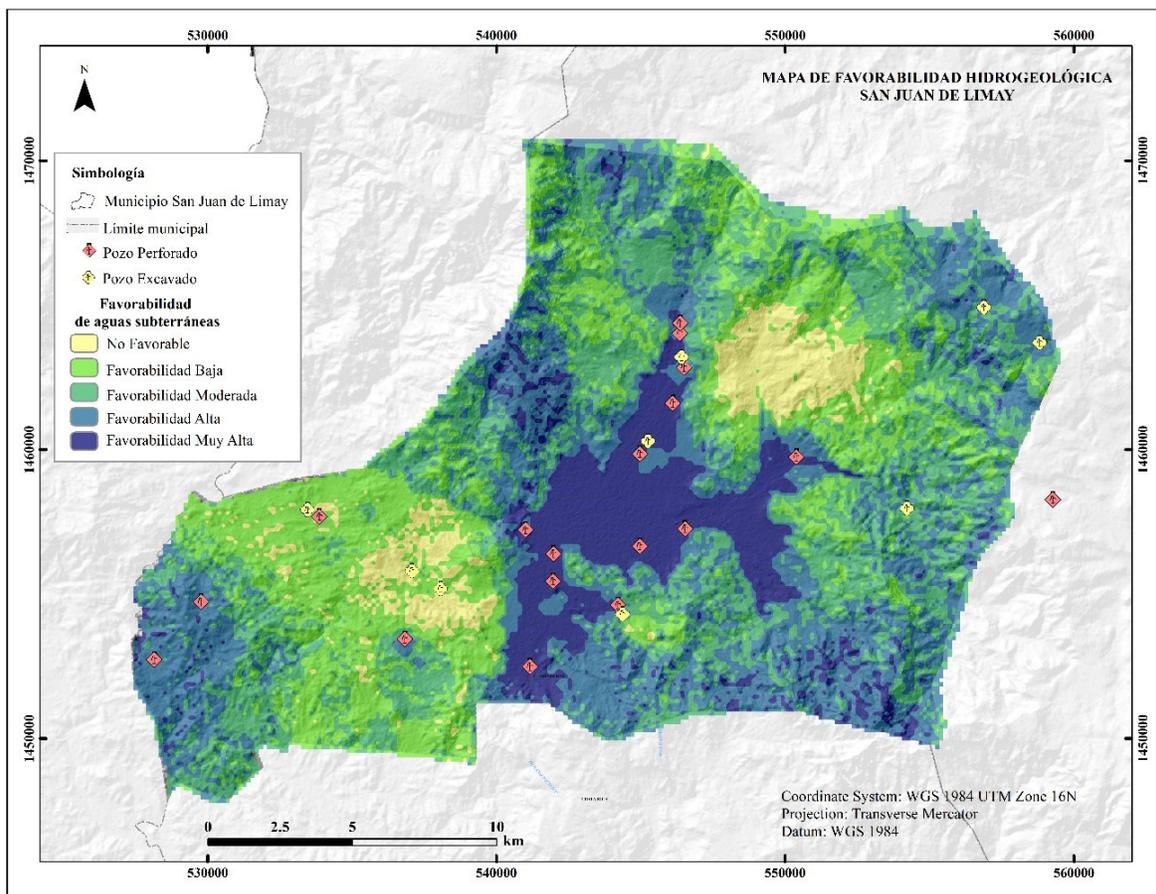


Figura 10. Mapa de favorabilidad hidrogeológica del municipio de San Juan de Limay, Estelí

## 6. AGREDECIMIENTOS

Agradecemos a la Red de Investigación Hidrogeológica para el Corredor Seco Centroamericano (HidroREDCA) y al Instituto de Geología y Geofísica (IGG/UNAN-Managua) por el apoyo brindado. De igual manera, se le agradece a la Alcaldía del Municipio de Limay por acompañarnos en la etapa de campo.

## 7. REFERENCIAS

- Ahmadi, H., Kaya, O. A., Babadagi, E., Savas, T., & Pekkan, E. (2021). GIS-Based Groundwater Potentiality Mapping Using AHP and FR Models in Central Antalya, Turkey. *Environmental Sciences Proceedings*, 1–15.
- Bernardes, J., Trovo, D., & Yoshinaga, S. (2017). Uso de geotecnologías na avaliação da favorabilidade hidrogeológica em aquíferos fraturados. *Águas Subterráneas*, 31(3), 15. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i3.28773>
- FAO. (2007). *Los Recursos Hídricos de Nicaragua*. Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura, 217, 78.
- GWP. (2016). *Gestión integrada de los recursos hídricos en Centroamérica: gestionando las aguas transfronterizas como desafío primordial*. [www.gwp.org](http://www.gwp.org)
- INETER, ANA, UNI, y GIZ. (2014). *Cuencas Hidrográficas de Nicaragua bajo la metodología Pfafstetter*. <http://www.ana.gob.ni/DocumentosSiAGUA/slideshow/AlbumCuencasNicRevisado.pdf>
- Ponnusamy, D. (2020). Mapping of Potential Groundwater Recharge Zones: A Case Study of Maputaland Coastal Plain, South Africa. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-566699/v1> License:
- Rahmati, O., Nazari Samani, A., Mahdavi, M., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2015). Groundwater potential mapping at Kurdistan region of Iran using analytic hierarchy process and GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 7059–7071. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1668-4>
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-l](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-l)