

# **INFORME TÉCNICO – EJECUTIVO SOBRE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS KÁRSTICOS**

## **Proyecto Caracterización de los Recursos Naturales de la provincia Ciego de Ávila**

**(Tarea Vida, 2020 – 2021)**

### **Elaborado por:**

Dr. C. Efrén Jaimez Salgado y Téc. Mario Guerra Oliva,  
Departamento de Geofísica y Geología Ambiental, IGA – Citma.

### **Introducción.**

El clima cambiante de nuestro planeta, resultado del incremento de la temperatura media global del aire, devenida a su vez del incremento inusitado del dióxido de carbono y otros gases de Efecto Invernadero desde la Revolución Industrial en Europa en 1789, no solo está provocando un retroceso acelerado de los casquetes glaciales en la Tierra y un aumento gradual y continuo del nivel medio del mar a escala planetaria, sino que asociado con todo esto, se están provocando a su vez, cambios drásticos en los ecosistemas marinos y terrestres, aumento del avance de la cuña de intrusión marina tierra adentro, con particular repercusión en los pequeños Estados insulares, y en consecuencia también, están ocurriendo cambios significativos en el contenido de sales solubles totales en muchos suelos agrícolas, con la consiguiente disminución de los rendimientos esperados y la productividad agrícola de las tierras en general.

Cuba, no está ajena a este flagelo, y el impacto negativo del clima cambiante, no sólo repercute en todo lo antes citado, sino aún más, repercute en la vulnerabilidad general de los acuíferos kársticos (particularmente los acuíferos subterráneos), debido además, a una mala gestión ocasional de dichos recursos, los cuales ostentan más del 80 % del total de las reservas de agua potable en nuestro país y coincidentemente, también en la provincia de Ciego de Ávila. De lo anterior se deduce, la importancia de contar con uno o varios mapas de vulnerabilidad de acuíferos en el territorio, cuyas mayores reservas de agua dulce se encuentran precisamente, en zonas y territorios cársicos (kársticos).

### **Marco Teórico y Conceptual.**

Existe una gran variedad de definiciones de vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas; en la mayoría de ellas, se refiere a las “propiedades intrínsecas del suelo, subsuelo y del acuífero que sirven de protección natural de las aguas subterráneas” (Auge, 2004). En este sentido, Albinet y Margat (1975) la definen como “*la protección natural que los estratos terrestres ejercen para atenuar la entrada de contaminantes hacia los acuíferos*”. Esta definición hace referencia a la exposición natural que tiene un acuífero. Un acuífero con poca profundidad, material

geológico sedimentario y suelo muy permeable, es más vulnerable a la contaminación. Por otra parte, no existe una metodología universal para el mapeo de la vulnerabilidad de acuíferos y aún menos, en el caso particular de los acuíferos kársticos. No obstante esta realidad, puede decirse que todos los métodos utilizados a escala global, parten por lo menos de cinco enfoques básicos, que son: el enfoque geológico, el enfoque geomorfológico, el enfoque hidrológico, el enfoque edafológico (suelos), y el análisis espacial complejo. De forma breve, puede decirse que el enfoque geológico es la base de partida de los restantes enfoques, para la identificación y clasificación de la vulnerabilidad de acuíferos, por cuanto de él dependen las características de los suelos, el tipo y grado de cobertura edáfica (la cual resultará clave para la determinación de la velocidad de infiltración de la lluvia y aguas superficiales, así como contaminantes) y las características generales del relieve (altura absoluta y altura relativa, pendiente, disección horizontal y vertical, etc). El enfoque hidrológico, es otro enfoque clave en la determinación de la vulnerabilidad de acuíferos y el enfoque hidrogeológico en particular, en el caso de los acuíferos kársticos, como los que predominan en la provincia de Ciego de Ávila, por cuanto estos territorios no cuentan con redes hidrográficas superficiales, y las que existen, de manera parcial o local, están poco definidas. De ahí que variables como las antes citadas en métodos ya utilizados, como el DRASTIC, sean de gran utilidad e importancia, en el caso de los acuíferos cársicos subterráneos. Finalmente, el análisis espacial complejo, al calor de la aplicación de técnicas avanzadas como el sensoramiento remoto a partir de imágenes satelitales, barridos de radar, etc., así como la aplicación de métodos derivados del uso de las herramientas SIG (buffers en capas vectoriales, overlay de capas temáticas, álgebra de mapas, etc), completan el amplio conjunto de enfoques empleados en este clase de estudios.

### **Antecedentes.**

El estudio realizado por los autores en la Provincia, contó a su favor, con antecedentes de investigaciones similares, realizadas por González – Abreu y Vidal (2015), los cuales obtuvieron un primer Mapa de Vulnerabilidad General de Acuíferos para la cuenca norte la provincia, a partir de la aplicación del Método DRASTIC, el cual toma en consideración un grupo importante de variables, tales como la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas (D), la tasa de recarga de éstas (R), el tipo de acuífero (A), el tipo de suelo (S), la topografía de la región estudiada (T), el impacto en la zona no saturada (I), y la conductividad hidráulica (C). En este sentido, es preciso señalar que los autores aplicaron una metodología reconocida como muy eficaz dentro de las investigaciones hidrogeológicas, pero algunas variables de la ecuación, que fueron ponderadas por los mismos (Variable **S**), con datos como el drenaje y la sistemática o taxonomía de suelos utilizada, puede

decirse que son actualmente caducas u obsoletas (Datos de la leyenda del Mapa de Suelos a escala 1: 25 000, de la Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes, MINAG, 1984,).

### **Materiales y Métodos.**

Para el estudio y obtención del nuevo Mapa de Vulnerabilidad General de Acuíferos Kársticos de la Provincia, se trabajó con la información y data derivada de la ***Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba*** (Instituto de Suelos, 1999), a partir de un trabajo de actualización en el campo, del Mapa de Suelos a escala 1: 100 000 (reducción por pantógrafo a escala 1: 250 000, editada por el antiguo Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, ICGC, 1971). Sobre esta base, se establecieron 28 estaciones de campo georreferenciadas, para la comprobación “in situ” en los suelos de la Provincia (incluidas 4 muestras para el laboratorio de química de suelos), en un perfil norte – sur realizado en el territorio, durante una semana de trabajo de campo realizad en el mes de diciembre de 2020, con itinerarios desde la costa norte en el asiento Isla de Turiguanó, hasta la costa sur de la provincia de Ciego de Ávila, en el asentamiento de Júcaro, así como un segundo recorrido parcial este – oeste, de Morón a Chambas y de éste último, hasta el litoral norte en Punta Alegre. Lo anterior, posibilitó de un lado la comprobación y actualización de la información del componente suelo en gran parte de la Provincia (particularmente en los suelos asociados directamente con la actividad del carso), y la confección por el otro, de un mapa inédito para la Provincia, de los Subtipos de Carso Epigeo (karst de Superficie) a escala 1: 25 000, resultados obtenidos para el territorio estudiado. De forma complementaria, se obtuvo un Mapa de Tipos de Carso Epigeo para la Provincia, en este caso sobre la base de criterios estrictamente geomorfológicos, resultante a su vez de los recorridos del perfil norte – sur y de otros derroteros trazados hacia el oeste (Tamarindo, Florencia, Jicotea, etc.) y en áreas del domo salino de Punta Alegre (carso diapiro, también llamado paracarso en yeso, de acuerdo con Panos, 1988).

Partiendo de la base actualizada de suelos, del mapa geológico digital a escala 1: 100 000 de la Provincia, del mapa digital de formas cársicas superficiales y subterráneas a escala 1: 250 000, elaborado por expertos del Instituto de Geología y Paleontología (IGP) y de la Agencia de Medio Ambiente (inédito), así como de los mapas de tipo y subtipo de carso epigeo a escala 1: 25 000 obtenidos por los autores de este documento para la Provincia, se realizó un overlay de capas temáticas, obteniéndose un mapa resultante con categorías de vulnerabilidad general, para los acuíferos kársticos del territorio. En este sentido, es necesario precisar que no se realizaron recorridos o estudios en áreas de la cayería norte de la Provincia, por lo que los mapas obtenidos solamente se refieren a la tipificación del karst superficial (carso epigeo) y la vulnerabilidad general de acuíferos kársticos, en el área de la tierra firme de Ciego de Ávila.

Finalmente, es importante señalar, que se consultó una amplia data estadística de salinidad de acuíferos de la Provincia, de una serie larga de mediciones del Instituto Provincial de Recursos Hidráulicos, años 1985 a 2017, de gran interés para los resultados del Proyecto, así como otra base de datos referida al nivel estático de las aguas subterráneas en la zona saturada, obtenidas a partir de 53 pozos, igualmente pertenecientes a la red provincial de Recursos Hidráulicos.

### **Resultados y Discusión.**

Ciego de Ávila, es una provincia eminentemente kárstica. De acuerdo con datos obtenidos del SIG, el 94,9 % del territorio es cársico (o kárstico, en el uso correcto de la voz eslava), de ahí la importancia de la realización de estudios carsológicos o karstológicos, a escala regional y provincial, encaminados en este caso en particular, a la implementación del Plan de Estado de Adaptación al Cambio Climático (Tarea Vida). De este casi 95 %, las llanuras cársicas o kársticas ocupan nada menos que, 5312,8 Km<sup>2</sup> (lo que representa el 85 % del área kárstica de la Provincia). Las alturas cársicas, solamente ocupan el 7,7 % del territorio (480,3 Km<sup>2</sup>), estando fundamentalmente representadas en las llamadas Alturas del Nordeste de Las Villas (sierras de Bamburanao y de Jatibonico del Norte) y en menor medida, en los domos salinos de Punta Alegre, de la Isla de Turiguanó, y de la Loma de Cunagua. El mapa que se muestra en la Fig. 1, ofrece una panorámica general más acabada, de la distribución geográfica de las áreas kársticas en la provincia de Ciego de Ávila (tipos de carso), al calor del levantamiento carsológico realizado por este equipo, durante los trabajos de campo en el territorio y posteriormente de gabinete.

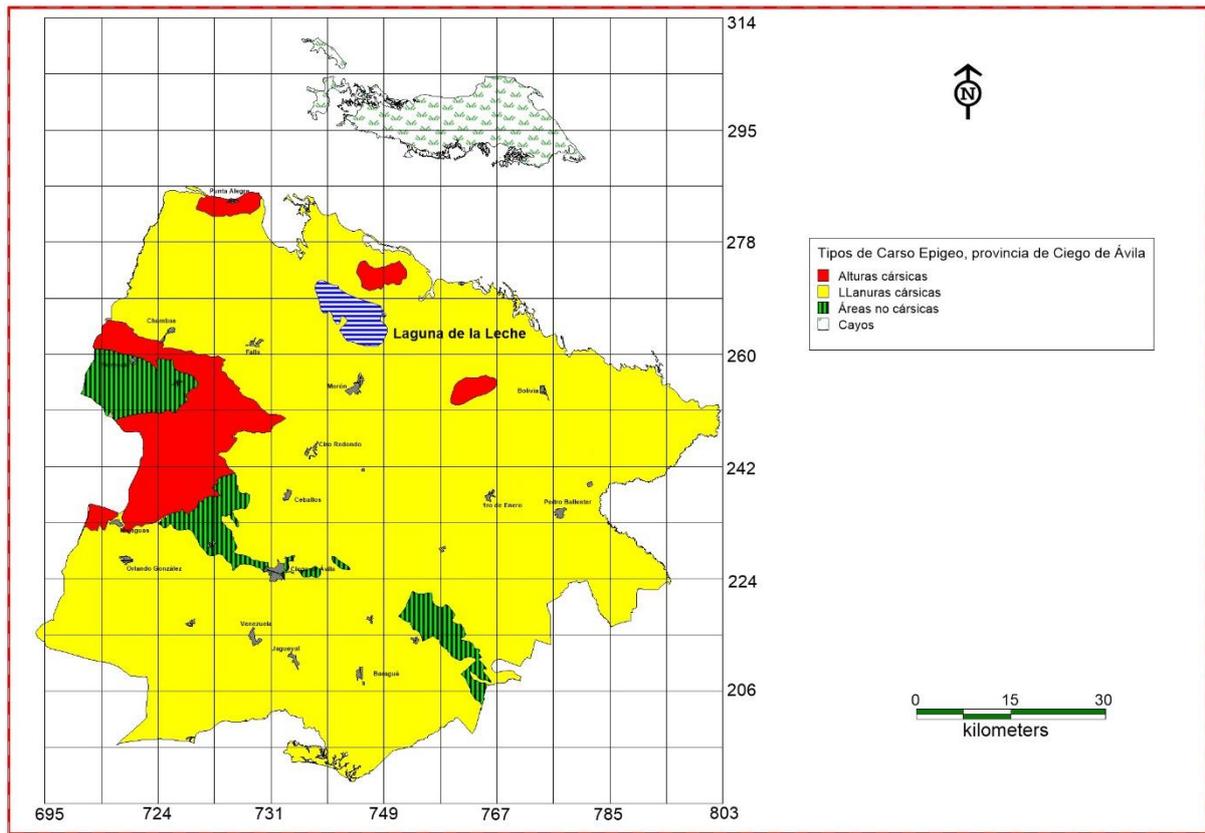


Fig. 1. Mapa de tipos de carso epigeo de la provincia Ciego de Ávila, 2021 (Original de los autores).

Como se aprecia en la Fig. 1, las llanuras cársicas son dominantes en el escenario geológico de la Provincia, siendo de destacar, el desarrollo local del carso diapiro (paracarso en yeso, de acuerdo con Panos, 1988), cuyo máximo exponente en Cuba, lo ocupan precisamente las lomas de Punta Alegre, ubicadas al noroeste de la Provincia.

Dentro de este contexto karstológico, se destacan un grupo significativo de subtipos de carsos, que obedecen de un lado al diseño geomorfológico de los tipos, en el caso particular de las alturas kársticas, o al tipo y grado de recubrimiento edáfico (suelos), en el caso de las llanuras kársticas. La Tabla I, ofrece una síntesis estadística, sobre el comportamiento de los subtipos de carso presentes en la provincia de Ciego de Ávila, resultado de los recorridos de comprobación realizados a lo largo y ancho de ésta, por parte de los autores.

**Tabla I. Estadísticas del SIG, de los subtipos de karst presentes en la provincia Ciego de Ávila.**

| No | Tipo de carso      | Subtipo de carso                                   | Área (km <sup>2</sup> ) | %    | Características generales   |
|----|--------------------|--|-------------------------|------|---|
| 1  | Llanuras kársticas | Carso cubierto por depósitos potentes              | 2549,3                  | 40,8 | Cubierto por Fm. Chirino, Guane y/o Fm. Guevara.                        |
| 2  | Llanuras kársticas | Carso cubierto por ciénagas y pantanos             | 761,07                  | 12,2 | Cubierto por depósitos lacuno- palustres y turberas                     |
| 3  | Llanuras kársticas | Carso cubierto                                     | 667,04                  | 10,7 | Cubierto por suelos rojos y Fm. Villaroja, profundos.                   |
| 4  | Llanuras kársticas | Carso estabilizado                                 | 557,9                   | 8,9  | Cubierto por suelos rojos profundos, con pH elevado.                    |
| 5  | Alturas kársticas  | Carso tabular                                      | 405,2                   | 6,5  | Tábulas y listones cársicos   |
| 6  | Llanuras kársticas | Carso cubierto por una delgada capa de suelos      | 373,6                   | 5,9  | Cubierto por suelos rojos, con pH neutro a ligeramente ácido.           |
| 7  | Llanuras kársticas | Carso estabilizado + carso enterrado               | 327,09                  | 5,2  | Combinación de 1 + 4  |
| 8  | Llanuras kársticas | Carso desnudo y semidesnudo                        | 80,5                    | 1,3  | Desnudo, o sólo parcialmente cubierto por rendzinas                     |
| 9  | Alturas kársticas  | Carso cupular achatado                             | 47,3                    | 0,8  | Cúpulas kársticas en calizas  |
| 10 | Alturas kársticas  | Carso cupular achatado en yeso (Paracarso en yeso) | 27,7                    | 0,4  | Cúpulas kársticas fundamentalmente en yeso + intercalaciones de calizas |

*(Fuente: original de los autores)*

Como se aprecia en la Tabla, el carso cubierto por depósitos de potencia (o depósitos potentes), básicamente constituido por importantes espesores de depósitos cuaternarios de las formaciones geológicas Chirino, Guane, y/o Guevara, es el subtipo predominante en la mayor parte de la provincia de Ciego de Ávila (40,8 % del territorio), con un recubrimiento de espesor significativo (en ocasiones mayores de 10 m), con un desarrollo de carso fisural subyacente, de baja o muy baja transmisividad. Un lugar no menos importante por su tipo y grado de recubrimiento edáfico en la Provincia, lo ostentan los subtipos de carso cubierto y carso estabilizado (10,7 y 8,9 % respectivamente). En el primero de estos casos, se trata de un subtipo de carso cubierto por suelos rojos profundos, con pH neutro hasta ligeramente ácido, en tanto el segundo (carso estabilizado), se ha desarrollado igualmente el carso sobre suelos rojos profundos, pero estos, con un contenido arcilloso mucho mayor que en el subtipo anterior, y con horizontes subsuperficiales compactados o con una fuerte tendencia a la compactación. Al respecto de este subtipo de carso estabilizado, Jaimez-Salgado y Guerra, 2019, han referido no sólo al desarrollo del sobre suelos profundos más eluvios y raíces de plantas como señala Gvozdietsky, 1939 (tomado de Mateo, 1981), sino además, al hecho de particular relevancia, de que los conductos subterráneos, si existen aquí, o bien son de carácter son fisural, o bien han sido rellenados o colmatados por arcillas rojas devenidas del proceso de sufosión kárstica, en condiciones de un pH en agua del suelo, superior a 7,7 (hasta 8,1 o mayor, o lo que es igual, pH de ligeramente hasta medianamente alcalino), lo que en condiciones de bajo contenido de  $\text{HCO}_3^-$  en las aguas kársticas de infiltración y baja transmisividad de acuíferos, limita la karstificación subterránea, con menor vulnerabilidad de los acuíferos asociados a este subtipo de karst. El mapa que se muestra en la Fig. 2, ofrece una panorámica general de la distribución

geográfica de la variabilidad de los subtipos de carsos superficiales, presentes a lo largo y ancho de la provincia Ciego de Ávila.

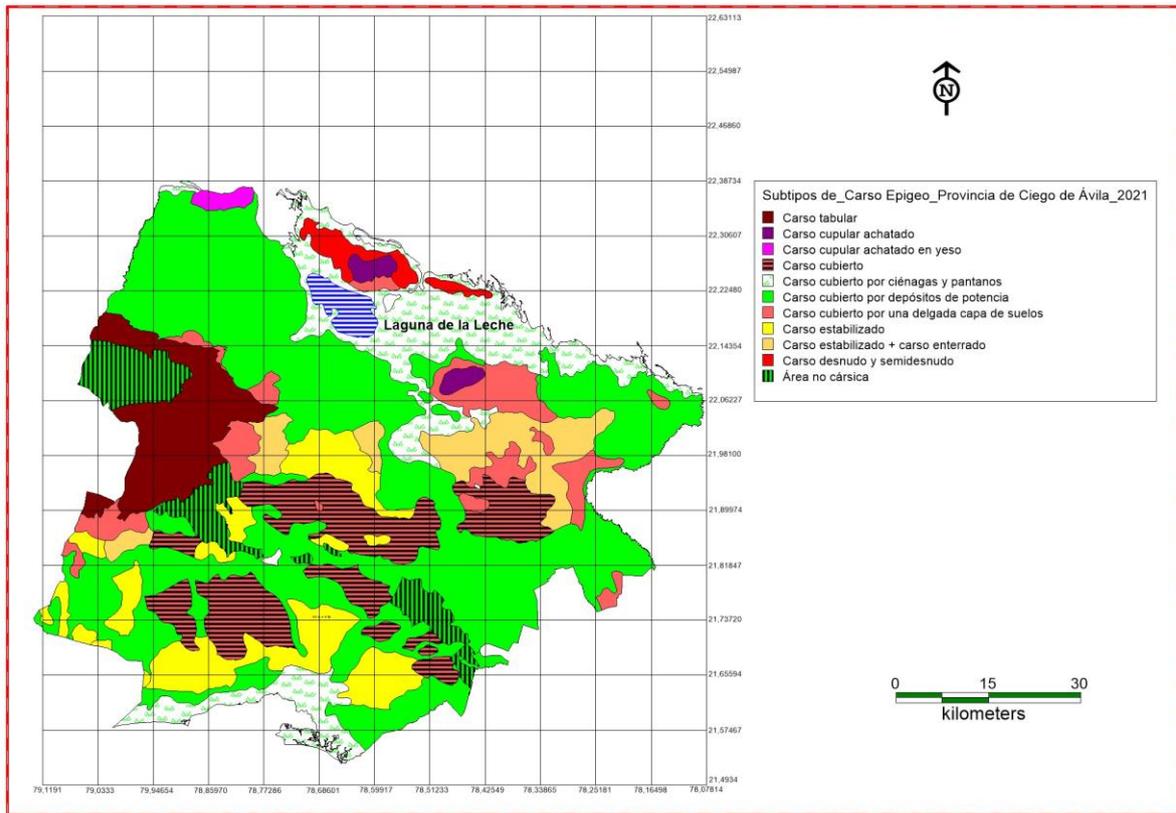


Fig. 2. Mapa de subtipos de carso epigeo (carso superficial) de Ciego de Ávila, 2021. (Original de los autores).

Como se aprecia en la Figura, existe una amplia variabilidad del karst superficial (carso epigeo) en la Provincia, resultado a su vez, de una amplia variabilidad y recubrimiento de las llanuras kársticas por diferentes tipos de suelos en el territorio, lo cual, unido a las condiciones locales de transmisividad kárstica de las aguas de la zona saturada (carso hipogeo), da lugar a una amplia diferenciación local y regional de la vulnerabilidad de acuíferos, en esta clase de litologías solubles.

### **Vulnerabilidad de acuíferos kársticos en la provincia.**

Por lo visto hasta aquí, la provincia de Ciego de Ávila, muestra una amplia variabilidad de tipos y subtipos de karst epigeo (carso superficial). La gran variedad por tipos de suelos y grado de recubrimiento edáfico de las calizas, unido a una marcada diferenciación de transmisividad en las aguas kársticas subterráneas de la zona saturada y la capa piezométrica (de flujo difuso en ambos casos), ha dado lugar a una amplia diferenciación por áreas o regiones, de la vulnerabilidad de acuíferos kársticos en la Provincia. Un aspecto de gran importancia en este sentido, lo constituye el

hecho de que alrededor de un 40,2 % de la Provincia, puede considerarse en base a los elementos o variables antes citadas, como Poco Vulnerable (2 513,7 km<sup>2</sup>). En este sentido, es preciso decir que el concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos Kársticos, utilizado en este estudio por los autores, se incluye no sólo la vulnerabilidad por infiltración de sustancias contaminantes provenientes de residuales líquidos de origen doméstico, industrial, y agrícolas, sino también, la vulnerabilidad de acuíferos a cuenta de la salinización secundaria de origen geológico (geoquímica de las aguas kársticas), aspecto éste, en el que abundaremos más adelante. La Tabla II, ofrece el comportamiento estadístico obtenido del SIG, para la Vulnerabilidad de Acuíferos en la provincia de Ciego de Ávila, de acuerdo con los autores.

**Tabla II. Vulnerabilidad de acuíferos kársticos subterráneos en la Provincia, según datos del SIG.**

| ID | Categoría de vulnerabilidad | Área (Km <sup>2</sup> ) | %    |
|----|-----------------------------|-------------------------|------|
| 1  | Muy vulnerable              | 1 666,6                 | 26,6 |
| 2  | Vulnerable                  | 320,03                  | 5,1  |
| 3  | Moderadamente vulnerable    | 884,96                  | 14,2 |
| 4  | Poco vulnerable             | 2 513,7                 | 40,2 |

*(Fuente: original de los autores)*

Como se aprecia en la Tabla, las áreas con categorías de Muy vulnerable, ocupan sólo el 26,6 % del total de la Provincia, en tanto solamente un 5,1 % puede ser considerado como Vulnerable, lo que está estrechamente condicionado de un lado, con el escaso grado de cobertura edáfica y sedimentaria en la superficie, en una parte poco significativa de las llanuras kársticas, y del otro, a la mayor transmisividad de las aguas kársticas subterráneas en estas áreas, con fuerte desarrollo anisotrópico del karst hipogeo. El mapa que se ofrece en la Fig. 3, muestra las áreas de distribución geográfica general de las categorías de vulnerabilidad según el SIG, en el contexto de la Provincia.

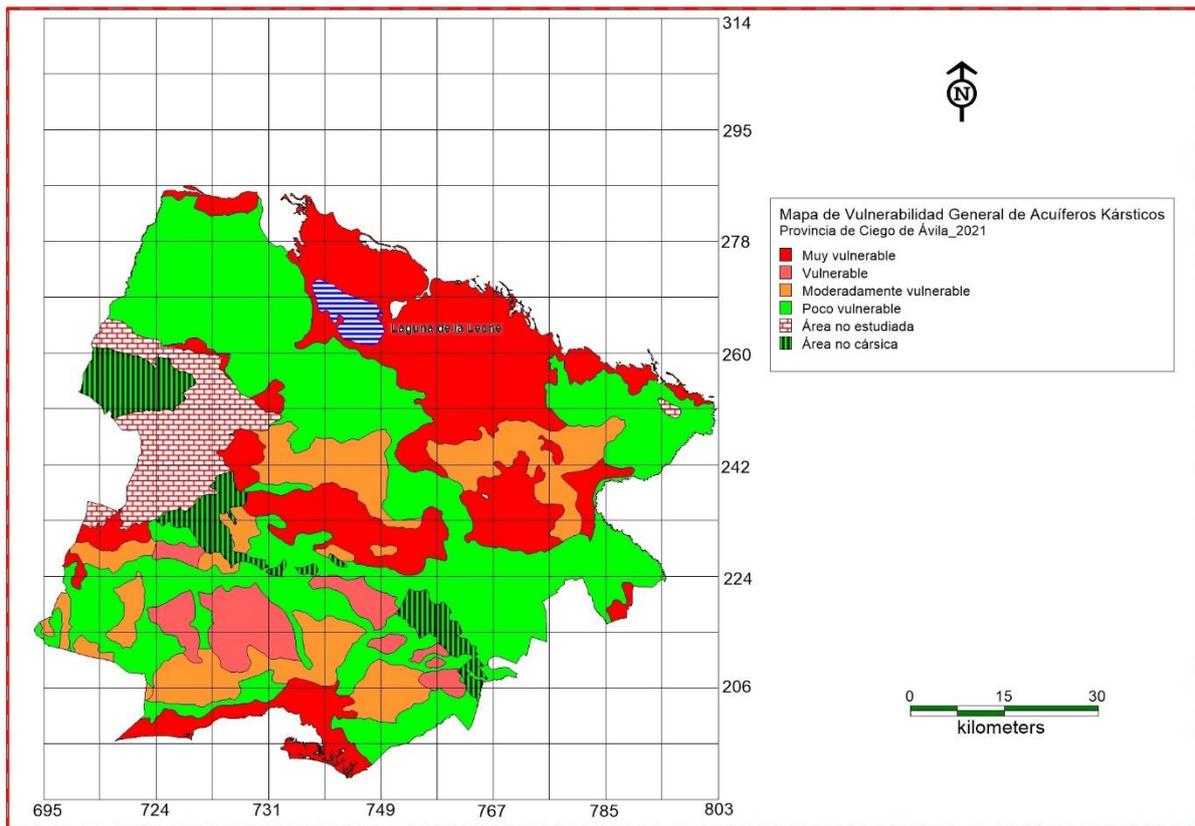


Fig. 3. Mapa de vulnerabilidad general de acuíferos kársticos de la Provincia, 2021.

*(Original de los autores)*

Como se aprecia en la Figura, las áreas Poco Vulnerables muestran una amplia región en gran parte de la porción noroeste y centro de la Provincia, asociadas a las formaciones geológicas Camacho, Guanés, y Guevara, en tanto las áreas más vulnerables se asocian a suelos rendziniiformes y suelos Ferralíticos Rojos de bajo pH y elevada transmisividad de acuíferos subterráneos en estas áreas. Asimismo, áreas de alta vulnerabilidad de acuíferos en color rojo en el mapa, se aprecian en las áreas de humedales costeros, al norte y sur de la Provincia, donde la zona saturada se encuentra aflorando en la superficie kárstica, siendo ésta por tanto, muy vulnerable también a la contaminación derivada del escurrimiento superficial de residuales de la Agricultura y de posibles efluentes domésticos o industriales, transportados desde relieves más altos, ubicados en el interior de la Provincia.

Finalmente, una pequeña área de unos 405,2 km<sup>2</sup> (sólo el 6,5 % de la provincia), aparece en el Mapa de Vulnerabilidad General de Acuíferos, como Área no estudiada. Esto se debe, a que se trata de un área de alturas kársticas medias (en el rango entre los 120 m y 200 m, snmm), básicamente distribuidas en el sector avileño perteneciente a la región orográfica de las Alturas del Nordeste de las Villas, en las que los acuíferos kársticos subterráneos son de flujo lineal, turbulento. Los acuíferos de este tipo, poseen una gran complejidad hidrogeológica (particularmente en cuanto al estudio y la

evaluación de su vulnerabilidad general), así como un menor grado de datos de aforos, lo cual hace muy difícil este tipo de estudio en ellos. Por esta razón, estos tipos de acuíferos habitualmente no se incluyen en los mapas de vulnerabilidad realizados hasta la fecha en Cuba, siendo ésta, una especie de asignatura pendiente para la mayor parte de hidrólogos e hidrogeólogos.

En otro orden, llama poderosamente la atención al realizar un análisis de la data de salinidad de la red de pozos de Recursos Hidráulicos de la Provincia, el hecho de que un grupo de pozos de abasto de agua, ubicados a una altura notable sobre el nivel medio del mar, presentan altos tenores de Sales Solubles Totales (SST), con valores de más de 1 000 mg/litro. La Tabla III, ofrece una selección de estos pozos y su cota o altura absoluta, como elemento clave, en el entendimiento de las causas de la salinización, que en estos casos consideramos son de origen geológico (geoquímica del karst).

**Tabla III. Selección de una muestra de pozos salinizados en zonas altas de la Provincia, según datos de la red de pozos de la Dirección Provincial de Recursos Hidráulicos de Ciego de Ávila.**

| Estación / Pozo               | Coordenadas |           |       | SST - Salinidad (mg/l) por Años |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
|-------------------------------|-------------|-----------|-------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
|                               | X           | Y         | Z     | 1985                            | 1986 | 1988 | 1991 | 1992 | 1993 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |   |
| 316 Los Sitios                | 780827.00   | 230216.00 | 33,4  | 642                             | 1190 | 617  | 872  | 900  | 792  | 762  | 600  | 710  | 0    | 654  | 827  | 786  | 0    | 630  | 0    | 0    | 718  | 640  | 925  | 547  | 0    | 0    | 0 |
| 1661 Los Sordos               | 762916.00   | 252177.00 | 12,8  | 1000                            | 681  | 583  | 1096 | 623  | 870  | 1002 | 1017 | 1144 | 0    | 834  | 866  | 716  | 1000 | 809  | 1000 | 0    | 670  | 649  | 752  | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 1598 Las Llavas, Baja         | 759600.00   | 255300.00 | 8,6   | 1113                            | 1004 | 1173 | 0    | 1525 | 1611 | 1417 | 1143 | 1101 | 1232 | 1120 | 0    | 777  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 709  | 654  | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 11972 Manolín                 | 793939.00   | 248432.00 | 6,3   | 566                             | 2419 | 2474 | 875  | 0    | 1978 | 1392 | 667  | 1934 | 0    | 1281 | 0    | 773  | 0    | 479  | 687  | 0    | 542  | 619  | 674  | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 1252 Ac Micro I-Bolívia       | 774898.00   | 253385.00 | 4,8   | 0                               | 0    | 608  | 856  | 1100 | 850  | 764  | 634  | 679  | 0    | 764  | 768  | 754  | 0    | 625  | 687  | 0    | 571  | 624  | 594  | 675  | 677  | 671  |   |
| 10370 Vegetitas               | 717751.00   | 275484.00 | 13,4  | 0                               | 0    | 674  | 0    | 1033 | 1022 | 0    | 1000 | 794  | 1000 | 1051 | 0    | 1097 | 892  | 674  | 0    | 710  | 747  | 741  | 799  | 0    | 0    | 0    |   |
| 6557 Marroquí                 | 714072.00   | 247019.00 | 192,1 | 0                               | 0    | 442  | 1010 | 690  | 749  | 0    | 609  | 1142 | 1000 | 1146 | 1021 | 1086 | 919  | 683  | 680  | 0    | 747  | 717  | 604  | 0    | 0    | 0    | 0 |
| Ac Sandino                    | 708840.00   | 259445.00 | 110,6 | 0                               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1001 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 3467 Acued. El Micro - Chamb  | 714963.00   | 263934.00 | 40,6  | 0                               | 0    | 0    | 1021 | 1051 | 1051 | 887  | 0    | 763  | 0    | 1053 | 924  | 1094 | 0    | 735  | 0    | 0    | 852  | 812  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 |
| 2658 El Embarcadero           | 744952.00   | 259437.00 | 1,1   | 0                               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 649  | 587  | 0    | 517  | 1569 | 1154 | 1154 | 0    | 0    |   |
| S/N La Escondida (Cochiguera) | 753420.00   | 270443.00 | 1,4   | 0                               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 2881 | 4060 | 445  | 7533 | 3808 | 4179 | 0    | 0    | 0    |   |
| S/N La Escondida (Cochiguera) | 753420.00   | 270443.00 | 1,4   | 0                               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 3457 | 0    | 0    | 0    | 2964 | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| 6011 Jicotea-Baja             | 725939.00   | 228424.00 | 61,6  | 0                               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1463 | 1518 | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| 6011 Jicotea-Baja             | 725939.00   | 228424.00 | 61,6  | 0                               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1572 | 1505 | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| Cooperativa 9 de Abril        | 759759.00   | 219266.00 | 48,5  | 0                               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1164 | 1189 | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
| Cooperativa 9 de Abril        | 759759.00   | 219266.00 | 48,5  | 0                               | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1513 | 1075 | 0    | 0    | 0    | 0    |   |

Como se puede apreciar en la Tabla III, marcados con el lápiz de color, tenemos aquí ocho pozos de la red provincial de Recursos Hidráulicos, con niveles de SST superiores a 1 000 mg/litro, ubicados en cotas relativamente altas, por encima de los 30 m, snmm. De estos, dos pozos muestran valores muy altos de SST, ubicados por encima de los 100 m, snmm (el pozo 6557 Marroquí en particular, se abre en cota de 192,1 metros de altura sobre el nivel medio del mar, ubicado en el ala suroeste, de la sierra de Jatibonico del Norte, grupo orográfico de las Alturas del Nordeste de las Villas. Sin lugar a dudas, esta salinidad es de origen geológico (geoquímica del karst), debido a una alta concentración de aguas kársticas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas magnésicas. De ello se concluye, que la Vulnerabilidad General de acuíferos kársticos en la provincia de Ciego de Ávila, debe entenderse no sólo desde la óptica de la vulnerabilidad a la infiltración de sustancias contaminantes hacia las aguas subterráneas, sino que se incluye aquí, la vulnerabilidad de los acuíferos a la salinización secundaria de origen geológico (y no a causa en este caso, de la intrusión salina del mar), por las causas y condiciones antes citadas en este documento. En este sentido, es loable destacar, que en el manejo futuro de las áreas kársticas vulnerables y muy vulnerables, mostradas en el mapa de la Fig. 3, se tengan en cuenta estos dos aspectos por parte de decisores, empresarios, agricultores, etc., como parte de un todo, evitándose en lo posible la sobreexplotación de acuíferos (sobre-bombeo), que a

la larga, podría conducir no sólo a la salinización secundaria de origen geológico (geoquímica del karst), sino a la salinización a su vez de los suelos agrícolas en superficie, como resultado del riesgo con dichas aguas bicarbonatadas, a pesar de la ubicación de estos pozos y regiones en cotas altas, alejadas de la intrusión salina de origen marino.

### Conclusiones:

1. El 94,9 % de la provincia de Ciego de Ávila, está geológicamente constituido por territorios cársicos (o kársticos). De estos, el 85 % son llanuras kársticas, en tanto sólo un 7,7 % corresponde a las alturas kársticas
2. La gran variedad de suelos y grado de recubrimiento edáfico de las calizas, unido a una marcada diferenciación en la trasmisividad de las aguas kársticas subterráneas en la zona saturada, ha dado lugar a una amplia diferenciación por áreas o regiones de la vulnerabilidad de acuíferos kársticos en el territorio
3. El 40,2 % de la Provincia, puede considerarse como **Poco Vulnerable** (2 513,7 km<sup>2</sup>), en base a las estadísticas obtenidas en el SIG, a partir del método de overlay de capas temáticas (algunas de ellas, obtenidas por vez primera en este estudio para la Provincia).
4. Las áreas con categorías de **Muy vulnerable**, ocupan el 26,6 % de la Provincia, en tanto sólo un 5,1 % puede ser considerado **Vulnerable**, lo que está condicionado de un lado por el escaso grado de cobertura edáfica y sedimentaria en la superficie, en gran parte de las llanuras kársticas, y del otro, por la mayor trasmisividad de las aguas kársticas subterráneas en estas áreas, caracterizadas por un fuerte desarrollo anisotrópico del karst hipogeo.
5. La Vulnerabilidad general de los acuíferos kársticos en Ciego de Ávila, debe entenderse no sólo desde la óptica de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas a la posible infiltración de sustancias contaminantes, sino también, a la vulnerabilidad de acuíferos a la salinización secundaria de origen geológico (geoquímica), como consecuencia de altos tenores de aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas, en las zonas piezométrica y saturada de las áreas o regiones más vulnerables, identificadas en el mapa.

### Recomendaciones.

1. Divulgar, generalizar, y extender los resultados de este estudio a nivel de decisores, directores de empresas, directores de cooperativas de producción agropecuarias, etc., como una vía expedita para la prevención de la contaminación y la salinización secundaria de origen geológico, en los acuíferos kársticos subterráneos de la Provincia
2. Evitar la sobreexplotación de acuíferos (sobre bombeo), así como el uso del riego por aniego en las tierras agrícolas de la Provincia, con aguas subterráneas extraídas en las áreas categorizadas como vulnerables y muy vulnerables, como vía efectiva para evitar la salinización secundaria de origen geológico de los acuíferos kársticos subterráneos, así como la posible salinización de los suelos agrícolas, distribuidos sobre estas áreas.
3. Procurar en lo posible el riego localizado, o en caso inevitable de otras formas de riego, realizarlo sólo en horarios de la mañana o final de las tardes, con el propósito de evitar la salinización secundaria de suelos y acuíferos kársticos, como consecuencia en este caso de las altas tasas de evaporación potencial, presentes en toda la Provincia.

4. Incrementar el monitoreo y estudios complementarios de este tipo, en las áreas o zonas con mayor grado de vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación y salinización secundaria de origen geológico (geoquímico).
5. Empezar estudios similares en áreas de la cayería norte de la Provincia, atendiendo no sólo a la vulnerabilidad de los acuíferos kársticos en dicha localidad, sino a la fragilidad de los hábitats y ecosistemas costeros de las mismas, encaminados a un mejor manejo turístico sostenible, en dichas áreas.

### **Referencias.**

- Dirección Nacional de Suelos y Fertilizantes, 1984. *Mapa de Suelos de la provincia de Ciego de Ávila*, a escala 1: 25 000. Ministerio de la Agricultura. Editado por Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (ICGC). La Habana.
- González–Abreu, R.; V. Vidal, 2015. Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero norte de la provincia Ciego de Ávila. *Rev. Ingeniería Hidráulica Ambiental* (36)(2): 45 – 46.
- Instituto de Suelos, 1971. *Mapa de Suelos de Cuba a escala 1: 250 000* (Reducción del levantamiento de suelos de Cuba, a escala 1: 100 000). Editado por el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía (ICGC). La Habana.
- Instituto de Suelos, 1999. *Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba*. Editorial AGRINFOR. Ministerio de la Agricultura. La Habana, 64 pp.
- Jaimez-Salgado, E. y M. Guerra, 2019. Escenarios de peligros geológicos por desarrollo del carso asociados al ascenso del nivel del mar y de las aguas subterráneas en la provincia de Cienfuegos, Cuba. (Registro Legal CENDA No. 4057-12-2018). *Memorias VIII Convención de Ciencias de la Tierra*. La Habana, 17 pp.
- Mateo, J, 1981. *Morfología Cársica*. Edición Universitaria. La Habana, 310 pp.
- Panos, V., 1988. Carsos de Cuba Oriental. Regionalización, Tipología, Utilización. *Studia Geographica* (91). Brno: 194 pp.

### **Bibliografía general.**

- Aguilar, Y.; F. Bautista; M.E. Mendoza; C. Delgado, 2013. Vulnerabilidad y riesgo de contaminación de acuíferos kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* (16)(2): 243 – 263.
- Albinet M.; J. Margat, 1975. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d' eau souterraine. Actes du Colloque de Moscou, Août, IAHS-AISH (103): 58 – 70.
- Andreo, B. ; N. Ravbar ; J. M. Vías, 2009. Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extensión of the COP method: application to pilot sites. *Hydrogeology Journal* (17)(3): 749 – 758.
- Antonakos, A. ; N. Lambrakis, 2006. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the DRASTIC model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology* (333)(2-4): 288 – 304.
- Auge, M, 2004. Vulnerabilidad de acuíferos. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología* (4): 85 – 103.
- Bakalowics, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal* (13)(1): 148 – 160.

- Bolio-Barrios, E. R. ; A. Cabrera-Sansores; F. Bautista; J. Pacheco-Ávila, 2011. Uso de la metodología EPIK para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatan, Mexico. *Teoría y Praxis* (9): 55 – 72.
- Croskrey , A. ; C. Groves, 2008. Groundwater sensitivity mapping in Kentucky using GIS and digitally vectorized geologic quadrangles. *Environmental Geology* (54)(5): 913 – 920.
- Cvijic, J. 1918. Hydrographie souterraine et evolution morphologique du karst. *Recueil des travaux de l'institut de géographie alpine* (6)(4): 375-426.
- Daly, D. ; A. Dassargues; D. Drew; S. Dunne; N. Goldscheider; S. Neale; I.C. Popescu; F. Zwahlen, 2002. Main concepts of the European approach to karst groundwater vulnerability, assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* (10)(2): 340 – 345.
- Davis, A.D. ; A. J. Long; M. Wireman, 2002. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifer in karst terrain. *Environmental Geology* (42)(1): 65 – 72.
- Doerfliger, N. ; P.Y. Jeannin; F. Zwahlen, 1999. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of define protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). *Environmental Geology* (39)(2): 165-176.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2002. A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology. NCEA. USA. Disponible en <http://www.hinko.org/hinko/Downloads/11/2/XI-2-09.pdf>
- Foster, S.S.D, 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: van Duijvenbooden, W., and van Waegeningh, H.G (eds.). *Vulnerability of soil and groundwater pollutants* (38). TNO Committee on Hydrological Research Proceedings and Information. Netherlands: 69 – 86.
- Gogu, R.C. ; A. Dassargues, 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology* (39)(6): 549 – 559.
- Goldscheider, N., 2005. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb. *Germany Hydrological Journal* (13)(4): 555-564.
- González–Abreu, R.; V. Vidal, 2015. Vulnerabilidad a la contaminación del acuífero norte de la provincia Ciego de Avila (36)(2): 45 – 46.
- Guo, Q. ; Y. Wang; X. Gao; Y. Ma, 2007: A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China. *Environmental Geology* (52)(5): 923-932.
- Iancu, O. ; P. Mihai; S. Daniel, 2007. Intrinsic vulnerability of Cotețul Dobreștilor Karst aquifer (Bihor Mountain, Romania). *Environmental Geology* (51)(5): 713-718.
- Jiménez-Madrid, A. ; F. Carrasco; C. Martínez, 2010. The protection of groundwater destined for human consumption in karstic aquifers advances towards safeguard zones. In: Andreo, B; F. Carrasco; J.J. Durán; J.W. LaMoreaux (eds.). *Advances in research in karst media*. Springer, Germany: 299-304.
- Kiraly, L., 2003. Karstification and groundwater flow. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifer* (1)(3): 1-26.
- Lindsey, B.D. ; B.G. Katz; M.P. Berndt; A.F. Ardis; K.A. Skach, 2010. Relations between sinkhole density and anthropogenic contaminants in select carbonate aquifers in the eastern United States. *Environmental Earth Sciences* (60)(5): 1073-1090.
- Mimi, Z.A. ; A. Assi, 2009. Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: a case study. *Journal of Hydrology* (364)(3-4): 298-310.
- Molerio, L., 1989. Aproximación multidisciplinaria a un modelo matemático del desarrollo del karst. *Ingeniería Hidráulica* (X)(2): 133-144.

- Molerio, L. ; J. Gutiérrez, 1999. Agricultural impacts on Cuban karstic aquifers. In: Drew, D., and H. Hötzl (eds.). Karst Hydrogeology and Human Activities. A.A. Balkema, Rotterdam: 76-78.
- Molerio, L., 2004. Indicadores de vulnerabilidad de acuíferos cársticos. Ingeniería Hidráulica y Ambiental (XXV)(3): 6 pp.
- Morales-Manilla, L.M., 2009. El análisis especial en la evaluación de la vulnerabilidad. Resumen y Conferencia. In: Bautista, F. ; P. Quintana; Y. Aguilar; J. Pacheco; D. Cabañas (eds.). Seminario sobre análisis de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la Península de Yucatán. CINVESTAV – Mérida, 15 pp. Disponible en: <http://www.ciga.unam.mx/seminariopy/Morales.pdf>
- NATIONAL COUNCIL RESEARCH, 2011. Ground Water Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential Under Conditions of Uncertainty. NRC – National Academy Press. Disponible en [http://www.nap.edu/catalog.php?record\\_id=2050](http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=2050)
- Nguyet, V.T.M. ; N. Goldscheider, 2006. A simplified methodology for mapping groundwater vulnerability and contamination risk, and its first application in a tropical karst area, Vietnam. Hydrogeology Journal (14)(8): 1666-1675.
- Núñez Jiménez, A., N. Viña, M. Acevedo, J. Mateo, J., Iturralde, A. Graña, 1984. *Cuevas y Carsos*. Editora Militar, La Habana: 431 pp.
- Pérez, C.R. ; A.J. Pacheco, 2004. Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el estado de Yucatán. Rev. Ingeniería (8)(1): 33-42.
- PHI – Unesco, 2010. Guía para Educación Básica sobre Protección de Aguas Subterráneas. Disponible en <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/guiasubterranea/principal/inicio.htm>
- Plan, L. ; K. Decker; R. Faber; M. Wagreich; B. Grasemann, 2009. Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus. Environmental Geology (58)(2): 285-297.
- Ravbar, N. ; N. Goldscheider, 2007. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. Acta Carsológica (36)(3): 397-411.
- Ravbar, N. ; N. Goldscheider, 2009. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. Hydrogeology Journal (17)(3): 725-733.
- Romano, N. ; M. Palladino, 2002. Prediction of soil water retention using soil physical data and terrain attributes. Journal of Hydrology (265): 56-75.
- Stigter, T.Y.; L. Ribeiro; A.M. Carvalho Dill, 2006. Evaluation of an intrinsic and specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinization and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. Journal of Hydrogeology (14)(1-2): 79-99.
- van Beynen, P.E. ; M.A. Niedzielski; E. Bialkowska-Jelinska; K. Alsharif; J. Matusick, 2012. Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karst aquifer in central Florida. Applied Geography (32)(2): 868-877.
- Vías, J.M. ; B. Andreo; M/J. Perles; F. Carrasco; I. Vadillo; P. Jiménez, 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers: COP method. Journal of Hydrogeology (14)(6): 912-925.
- Vargas-Quintero, M.C, 2010. Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia. Dirección de Ecosistemas – Grupo de Recurso Hídrico. Bogotá, 45 pp.

- Vías, J.M. ; B. Andreo; N. Ravbar; H. Hötzl, 2010. Mapping the vulnerability of groundwater to the contamination of four carbonate aquifers in Europe. *Journal of Environmental Management* (91)(7): 1500-1510.
- Vlaicu, M. ; C.M. Munteanu, 2008. Karst groundwaters vulnerability assessment methods. *Academiei Institut de Spéologie Émile Racovitza. Rumane. XLVII: 107-118.*
- Wösten, J.H.M. ; Y.A. Pachepsky; W.J.Rawls, 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* (251)(3-4): 123-150.
- Zwahlen, F., 2003. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, scope, goal, results. European Commission, COST Action 620. Belgium. Disponible en [http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Cost620\\_fb\\_02.pdf?\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Wasser/Projekte/abgeschlossen/F+E/Cost620_fb_02.pdf?_blob=publicationFile&v=1)