

# ***Estudio Hidrogeológico para Determinación de Aguas Subterráneas Directamente Influenciadas por Aguas Superficiales en Puerto Rico***

Orlando D. Rivera Montijo  
Maestría en Ingeniería en Ingeniería Civil  
Christian A. Villalta Calderón, Ph.D.  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Universidad Politécnica de Puerto Rico

---

**Abstracto**— *Las Aguas Subterráneas de Puerto Rico y sus Acuíferos son un Recurso muy importante para el País. Este Recurso se ha visto afectado por estar influenciado directamente por aguas superficiales. En Puerto Rico se está realizando un Protocolo para determinar que pozos están bajo riesgo de influencia de agua superficial. En este Proyecto se realizó una Investigación para realizar este Protocolo con un Estudio Hidrogeológico. Para realizar este estudio se dividió la Isla en tres regiones, Norte, Centro y Sur. Esto debido a su geología variada. La Investigación demostró que la Geología de Puerto Rico es un factor importante y determinante a la hora de determinar si un agua subterránea está siendo influenciada por un agua superficial. Esta Investigación demostró que la gran mayoría de los Acuíferos de Puerto Rico están bajo Riesgo de ser influenciados por aguas superficiales, esto debido a la geología de la zona o al mal manejo de contaminantes por el ser humano.*

**Términos Claves** — *Acuífero, Estudio Hidrogeológico, Flujograma, Geología.*

## **INTRODUCCIÓN**

Un GWUDI es un cuerpo de Agua Subterráneo Directamente Influenciado por un Agua Superficial. En Puerto Rico y Estados Unidos existen Guías de cómo determinar si un cuerpo de agua subterráneo está bajo riesgo de GWUDI. Estas guías te indican cuáles son los procesos y pruebas a realizar a la hora de determinar si un sistema está bajo riesgo de GWUDI. En Puerto Rico para poder determinar esto se tienen que realizar ciertos estudios, entre ellos: Estudio de Calidad de Agua o un Estudio Hidrogeológico. Comúnmente se utiliza el Estudio de Calidad de Agua, aunque ambos son efectivos, debido a que es más económico [1]. El

objetivo de este proyecto es realizar una investigación de las condiciones geológicas, climáticas, hidrológicas de la Isla y además realizar una revisión bibliográfica detallada de algunas Guías Hidrogeológicas existentes para crear una que sirva de guía y permita determinar si un abasto de agua subterránea en Puerto Rico es GWUDI o Non-GWUDI. Esta guía será creada considerando las condiciones locales de la Isla antes mencionadas.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

El *Surface Water Treatment Rule* define GWUDI como “Cualquier Agua debajo de la superficie del suelo con (i) significativa ocurrencia de insectos o macro-organismos, alga, patógenos de diámetro largo como la “*Giardia Lamblia*” o (ii) cambios significantes y rápidos de turbidez, temperatura, conductividad o pH los cuales se correlacionan con condiciones climatológicas o de aguas superficiales.”

Un GWUDI puede ser causado debido a la cercanía de cuerpos de aguas superficiales a las zonas de recarga de los acuíferos. Además puede ser causado debido a que existe una conexión hidráulica entre el Agua Superficial y el Agua Subterránea. Las aguas subterráneas típicamente fluyen hacia cuerpos de aguas superficiales como ríos y lagos, sin embargo también ocurre lo contrario debido al cambio del nivel del agua ocasionado por grandes escorrentías. Estos movimientos pueden ocurrir en ambas direcciones a través de conexiones hidráulicas, dependiendo del nivel del agua en el agua superficial. También el agua superficial puede entrar al acuífero como resultado de la extracción excesiva de agua de un pozo cercano [2].

Típicamente el tratamiento de aguas subterráneas solo requiere desinfección y filtración. Sin embargo si un agua superficial influye una subterránea este tratamiento no es suficiente ya que contaminantes como *Cryptosporidium* sobreviviría a estos tratamientos, llegando así a los sistemas de distribución. La presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* en aguas subterráneas son indicios de GWUDI ya que estos patógenos solo se encuentran en aguas superficiales [3]. Estos patógenos pueden recorrer grandes distancias debido a su pequeño tamaño. Sin embargo, mientras más distancia recorra es más probable que se filtre bajo procesos naturales.

Para determinar si un cuerpo de agua subterráneo está influenciado por un agua superficial comúnmente se requiere un *Microscopic Particulate Analysis* (MPA). Esta prueba evalúa la presencia de contaminantes de aguas superficiales en aguas subterráneas. El MPA puede evaluar la extensión de la filtración y el riesgo de la misma. La presencia de *Giardia* y *Cryptosporidium* no se encuentra siempre en todas las aguas superficiales en todo momento, por lo tanto obtener resultados negativos de estos 2 patógenos en una prueba no significa que estos no se encuentren en el agua [3]. Sin embargo otros organismos como algas e insectos siempre se encuentran en aguas superficiales. Varios estudios han concluido que se deben tomar más parámetros o estudios en consideración.

### **Clima de Puerto Rico**

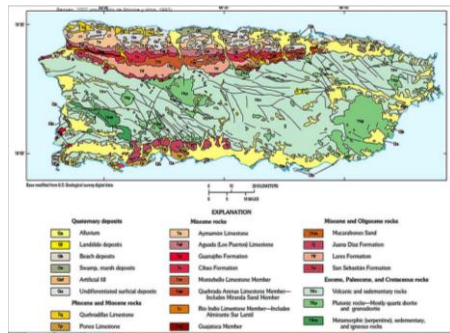
El Clima es uno de los factores principales que afecta los acuíferos de la Isla. La precipitación y la temperatura son 2 factores importantes. Parte de la precipitación se infiltra en el suelo recargando los acuíferos, pero otra parte se convierte en escorrentía o se evapora por las altas temperaturas de la isla. La precipitación es bien variada en la Isla. El promedio anual de lluvia en Puerto Rico es de 69 pulgadas, variando desde 35 pulgadas en el Valle de Lajas (extremo suroeste) hasta 174 pulgadas en el Bosque Nacional del Yunque en el este de la Isla [4]. Según el Departamento de Recursos Naturales

en la Región Norte la precipitación promedio anual es de 70 pulgadas, mientras que en el sur es de 45 pulgadas. La intensidad mayor del efecto orográfico es en la Región Norte, debido a que los vientos del este-noreste prevalecen sobre la Isla la mayor parte del año [5]. La precipitación no solo varía por zona, también varía por épocas del año. En la Isla ocurren eventos de sequías de enero a abril y de julio a agosto, mientras que de mayo a junio y de septiembre a diciembre ocurren eventos de lluvias frecuentes. La temperatura de la isla cambia con la elevación, evaporación y condensación. Según el *National Weather Service* la temperatura promedio de Puerto Rico es de 82 grados Fahrenheit (° F) y está dentro del rango de 78 grados y 88 grados Fahrenheit la mayoría del año. En los últimos años se ha visto una tendencia en el aumento de temperaturas en toda la Isla.

### **Geología de Puerto Rico**

La Geología es un factor importante a la hora de determinar un GWUDI. La diversidad geológica de Puerto Rico se debe a que su formación ocurrió en diferentes periodos geológicos. La geología de la isla es muy variada y se puede dividir en 3 regiones geográficas. La primera de estas es la Región Central. Esta región se compone de la Cordillera Central de la Isla la cual está formada por rocas de origen volcánico y tiene un alto grado de fracturas. Algunas de estas fracturas obtuvieron como resultado manantiales. El origen de estas rocas fue ocasionado por erupciones volcánicas y movimientos sísmicos de gran magnitud. La segunda es la Región Norte, Región del Karso, y la Sur. Esta región se compone de roca caliza, depósitos de aluvión, arena y materia orgánica. Además en esta región es donde se encuentran los acuíferos más importantes de la Isla, especialmente en el Norte. En la Región Norte se extiende desde Carolina hasta Aguada y en la Sur desde Juana Díaz hasta Peñuelas. A diferencia de la Región Norte, la Región Sur no cuenta con Acuíferos de grandes proporciones ya que sus rocas tienen alto contenido de barro y cieno [6]. Las condiciones geológicas y geoquímicas del norte y sur son diferentes. La

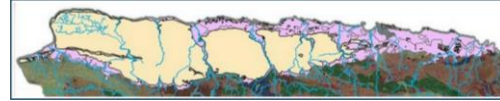
tercera corresponde a la Región de los Valles Aluviales Costaneros, específicamente de la zona Norte y Sur de la Isla. El aluvión es una mezcla que se compone de arena, grava y piedra. En esta región se encuentran varios acuíferos aluviales. Aunque existen depósitos aluviales en las regiones este y oeste de la Isla, estos son de menor importancia y no representan acuíferos significativos [7]. También existen acuíferos aluviales en los valles del interior en Caguas, Cayey y Cidra.



**Figura 1**  
**Geología de Puerto Rico**

### Región Norte del Karso

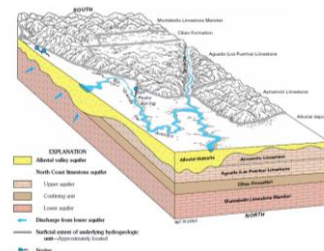
La Región del Karso del Norte de Puerto Rico es una de las características geológicas y fisiográficas más importantes de la Isla [4]. Esta región se conoce por la gran cantidad de drenaje subterráneo debido a la alta cantidad de sumideros. En esta región la mayor parte de la escorrentía se infiltra al subsuelo, contrario a lo que ocurre en la Región Montañosa donde predominan las rocas de origen volcánico [6]. La lluvia que capturan estos sumideros es la fuente principal de recarga de los acuíferos de esta zona. Las mismas características que hacen el agua subterránea del Karso productiva la hacen altamente vulnerable a la contaminación [8]. En esta zona existen cuatro ríos con tramos subterráneos lo cual pone en riesgo el agua subterránea en caso de existir Riesgo de GWUDI. Estos ríos son Río Guajataca, Río Encantado, Río Camuy y Río Tanama. Los pozos de mayor riesgo de GWUDI se encuentran en zonas cercanas a Sumideros [3]. La Región del Karso se compone de rocas calizas de las formaciones Lares, Montebello, Cibao, Aguada, Camuy, y Aymamon.



**Figura 2**  
**Región Norte del Karso**

### Aguas Subterráneas de Puerto Rico

Puerto Rico tiene 2 áreas principales de aguas subterráneas, la Norte y la Sur. El Agua Subterránea de la Costa Norte de Puerto Rico se compone de 2 Acuíferos. Un Acuífero No Confinado que se encuentra en la parte Superior y un Acuífero Confinado Artesiano en la parte Inferior. El Acuífero Superior se conecta a la superficie a lo largo de su área, mientras que el Acuífero Inferior está confinado hasta llegar a la costa y aflora al sur del acuífero superior desde donde se recarga [8]. Estos Acuíferos son una fuente principal para el consumo Humano, Industrial y Urbano. Existen pozos que utilizan agua del Acuífero Inferior, específicamente para uso Industrial.



**Figura 3**  
**Diagrama de Acuífero Superior e Inferior y su Composición de Rocas Calizas en el Río Grande de Arecibo**

El Agua Subterránea de la Costa Sur se compone de varios Acuíferos Aluviales, no de un acuífero continuo. Los acuíferos de la zona Sur se extienden desde Patillas hasta Lajas. Los acuíferos de la Región Sur son una fuente importante de agua para consumo humano y actividades agrícolas, produciendo aproximadamente el 31 % de toda el agua que se utiliza en la zona [9]. En cuanto a la Zona Central de la isla los acuíferos son muy escasos. Esto es debido a que esta región está compuesta de rocas volcánicas, el suelo tiene baja permeabilidad y además existen altas pendientes las cuales dirigen el agua a las zonas costeras [4].

## Calidad de las Aguas Subterráneas de Puerto Rico

La extracción excesiva en los Acuíferos afecta su Calidad de Agua ya que esto provoca la intrusión salina. En la Zona Norte de la Isla los 2 Acuíferos existentes, Superior e Inferior, se han visto afectados por el exceso de extracción. El desarrollo Industrial en la Zona Norte ha afectado el Acuífero Superior debido a la alta extracción. Debido a esta situación la extracción en la zona ha disminuido. La calidad de agua también se ha visto afectada por derrames de productos químicos de las Farmacéuticas de la zona. Las características del Acuífero Superior lo hacen altamente vulnerable a la contaminación [8]. Otro factor que contribuye a la contaminación del Acuífero Superior es la gran cantidad de pozos sépticos en la zona. También la calidad del agua se ha visto afectada por los sumideros existentes en la zona kárstica ya que personas de la región tienen la costumbre de utilizarlo como vertedero clandestino, tirando basura en los sumideros, contaminando así directamente el agua subterránea. La contaminación del Acuífero Inferior de la Zona Norte de Puerto Rico se limita a la zona de recarga ya que es un Acuífero Confinado. El Acuífero Inferior también es afectado por contaminación química asociada a la columna de agua salada que muchos pozos artesianos atraviesan, en el Acuífero Superior, para poder extraer agua fresca confinada cerca del litoral costanero [4]. Esto causa un intercambio de agua entre el Acuífero Superior e Inferior debido a que rompe los sellos hidráulicos de los pozos. Este Acuífero se puede proteger de contaminación protegiendo la zona de recarga. La Calidad de Agua en la Región Sur se ha deteriorado debido al aumento en salinidad provocada por extracciones excesivas. Estas extracciones excesivas provocan el aumento de sólidos disueltos y el movimiento de la interface de agua dulce-salada. También existen problemas de contaminación de los acuíferos del sur por químicos provenientes de derrames accidentales, escorrentía urbana, disposición de gallinaza, aplicación de

fertilizantes y plaguicidas agrícolas, y la disposición de aguas usadas mediante pozos sépticos [9].

## METODOLOGÍA

La mayoría de los Estados tienen un Protocolo para la determinación de GWUDI. Puerto Rico tiene su protocolo desde septiembre de 2009 [1]. Actualmente en Puerto Rico se está realizando un Proyecto para la determinación de GWUDI de los pozos existentes la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico. Para determinar si tienen influencia de agua superficial se están utilizando varios métodos, estos son un Estudio de Calidad de Agua, un Estudio Hidrogeológico y el Método MPA. El Protocolo está compuesto de cuatro Fases. En la primera fase cada pozo pasa por una Evaluación Preliminar. En esta fase se descartan los pozos que son Non-GWUDI. Los demás pozos que tienen riesgo de GWUDI pasan a la segunda Fase llamada Proceso de Determinación de GWUDI. En esta fase se realiza un estudio de Calidad de Agua o un Estudio Hidrogeológico. Para este Proyecto de Puerto Rico están utilizando el estudio de Calidad de Agua. Cuando no se llega a una determinación con este estudio se realiza un Método MPA. Este Método es la tercera Fase del Protocolo. Ya en la Cuarta Fase solo se encuentran los pozos identificados como GWUDI. Los pozos que llegan a esta fase requieren tratamiento de agua superficial o se tienen que cerrar. A continuación se muestra un flujograma del Protocolo.

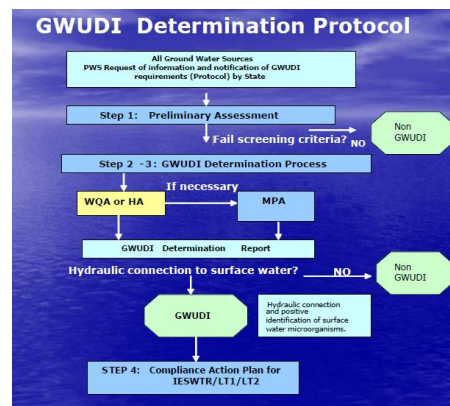


Figura 4

Flujograma de Protocolo GWUDI para Puerto Rico

En Puerto Rico para la Fase 2 se utiliza el Estudio de Calidad de Agua. Pero también existe la opción de escoger un Estudio Hidrogeológico para determinar GWUDI.

Un estudio Hidrogeológico nos permite determinar si existe una conexión hidráulica la cual permita al sistema subterráneo recargarse de un agua superficial o de precipitación. El objetivo de un Estudio Hidrogeológico es determinar si un agua subterránea esta bajo riesgo de GWUDI o no. Varias Organizaciones utilizan ahora una Evaluación Hidrogeológica como una de las herramientas para evaluar el estado del medio ambiente que manejan [10]. Un estudio Hidrogeológico se compone de un estudio geológico, uno hidrogeológico, geoquímico y de contaminación del lugar de estudio. Un Estudio Geológico busca determinar la Geología Superficial del Área de Estudio.

La Geología de Puerto Rico varía grandemente a pesar de su pequeño tamaño. Este factor es bien importante ya que si la geología es beneficiosa para una conexión hidráulica el contaminante del agua superficial va a llegar al agua subterránea. La Geología del Norte, Centro y Sur de la Isla tienen sus propias identidades y este factor es vital para la determinación de un GWUDI. Por lo tanto se decidió dividir la determinación de GWUDI en 3 Regiones, Región Norte, Región Centro y Región Sur. No incluimos Este y Oeste porque en estas regiones los cuerpos de agua subterráneos son limitados y los existentes no representan acuíferos significativos [4].

### **Región Norte**

En todo el Karso existen sumideros debido a su bajo contenido de carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ . La disolución del  $\text{CaCO}_3$  por la lluvia y la escorrentía ha resultado en la formación de la red de sumideros y mogotes presentes en el Karso. La lluvia que capturan los sumideros es la fuente primordial de recarga de los acuíferos Superior e Inferior de la Costa Norte. La alta presencia de sumideros es indicio de GWUDI ya que los sumideros son una red de conductos abiertos y porosos donde el agua

fluye arrastrando despojos y contaminantes. También existen varios ríos con tramos subterráneos lo que aumenta el riesgo de GWUDI ya que estos tienen secciones superficiales que están expuestas a contaminación. Otro factor importante es la gran abundancia de pozos sépticos en la Región del Karso. Los pozos de mayor riesgo de GWUDI se encuentran en zonas cercanas a Sumideros [3].

En esta región el riesgo de GWUDI es mucho mayor que en el Centro y el Sur por la información mencionada. La geología de la zona, la alta presencia de sumideros y la alta presencia de pozos sépticos provoca un alto riesgo de GWUDI. Por lo tanto para determinar GWUDI en el Norte hay que ser más estrictos en cuanto a los parámetros establecidos en el flujograma.

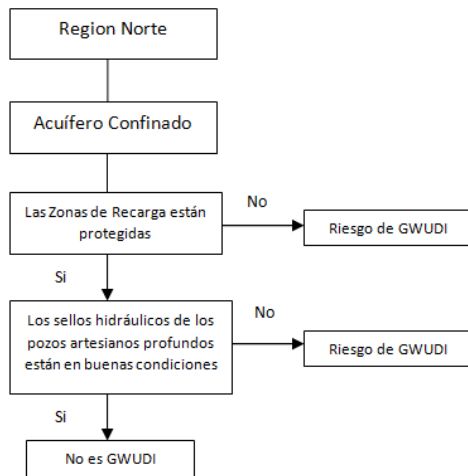
Esta Región la dividimos en 2 grupos, Acuífero Confinado y Acuífero No Confinado. En el Norte se encuentra la Zona Kárstica y en ella 2 acuíferos principales el Superior y el Inferior conocido como el Acuífero Artesiano.

### **Acuífero Confinado**

Para el Acuífero Confinado de la Zona Norte se tiene que determinar si la zona de recarga del acuífero está protegida o no. En Estados Unidos las zonas de recarga de los acuíferos confinados están identificadas y protegidas evitando así el riesgo de GWUDI. La zona de recarga de estos acuíferos se protege cerrándola y no permitiéndole acceso a nadie. En Puerto Rico esto no ocurre, por lo tanto estos acuíferos también están bajo riesgo de GWUDI. Si no está protegida este acuífero tiene riesgo de GWUDI. Si está protegida se pasa al siguiente paso.

En el segundo paso se tiene que determinar si los sellos hidráulicos de los pozos artesianos están en buenas condiciones o no. En los municipios de Manatí, Barceloneta y Arecibo existen pozos artesianos utilizados por Farmacéuticas. El Acuífero Confinado es afectado por contaminación química debido al agua salada que muchos pozos artesianos atraviesan en el Acuífero No Confinado para poder extraer agua fresca

confinada. Esta capa de agua salada ocurre naturalmente en la parte costanera profunda del Acuífero Superior. El agua salobre en esta columna corroe y rompe los sellos hidráulicos en los pozos artesianos profundos. Esto causa que el agua del Acuífero Inferior se escape al Acuífero Superior, y que agua salada pueda infiltrarse hacia los pozos artesianos del Acuífero Inferior. Si los sellos hidráulicos no están en buenas condiciones tiene riesgo de GWUDI. Si están en buenas condiciones es un Non-GWUDI.

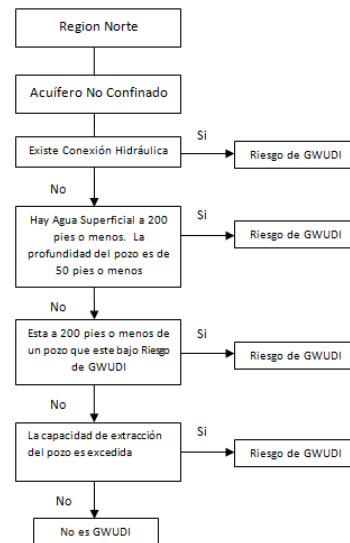


**Figura 5**  
Flujograma para Determinación de GWUDI de Acuífero Confinado Región Norte

### Acuífero No Confinado

El Acuífero No Confinado tiene un riesgo de GWUDI alto debido a su Geología. Este Acuífero se encuentra en la Región Karstica. En esta región existe una gran cantidad de sumideros lo que pone en riesgo de GWUDI el agua subterránea. Además esta región tiene una gran cantidad de pozos sépticos mal construidos. Para determinar si un pozo o agua subterránea en el Acuífero No Confinado es GWUDI o no se tiene que determinar si existe una Conexión Hidráulica o no. Si existe una conexión hidráulica está bajo riesgo de GWUDI. Si no existe se pasaría al siguiente paso. En el segundo paso se tiene que determinar si existe un pozo a 200 pies o menos de un cuerpo de agua superficial, o si la profundidad del pozo es de 50 pies o menos. Por ejemplo si un pozo está a menos

de 200 pies de un río la extracción del pozo puede provocar que el río sea efluente, viéndose así influenciado por un agua superficial. Bajo la clasificación de Agua Superficial se incluye escorrentías, arroyos intermitentes, ríos, lagunas, lagos, algunos humedales y embalses naturales o artificiales que reciben el agua de escorrentía superficial [11]. De contestar si, está bajo riesgo de GWUDI. De contestar no, pasaría al siguiente paso. En el tercer paso se tiene que determinar si existe un pozo a 200 pies o menos que este influenciado por aguas superficiales. Este paso es bien importante ya que puede ocurrir que un pozo no esté a 200 pies o menos de un agua superficial, pero si a 200 pies o menos de un pozo influenciado por un agua superficial. De ser así el pozo está influenciado por un agua superficial, por lo tanto esta bajo riesgo de GWUDI. De contestar no, se pasa al siguiente paso. En el cuarto paso se tiene que determinar si la capacidad de extracción del pozo está siendo excedida. Si se excede la capacidad de extracción del pozo se puede provocar la migración de contaminantes ocasionados por aguas usadas de pozos sépticos o se puede provocar intrusión salina. De contestar si, está bajo riesgo de GWUDI. De contestar no, no es GWUDI.



**Figura 6**  
Flujograma para Determinación de GWUDI de Acuífero No Confinado Región Norte



## Región Centro

Esta región no constituye una fuente significativa de agua subterránea debido a la naturaleza de las rocas que la forman y de las pendientes existentes. Aún así, existen bolsillos en valles aluviales interiores y zonas de fallas locales y fracturas en las rocas en toda la región, donde el potencial para producir agua es significativo. Pero en general, la combinación de las pendientes escarpadas que aceleran el flujo de la escorrentía hacia las costas, y la baja permeabilidad de los suelos y las rocas en el interior limitan la capacidad de esta zona como fuente de agua subterránea significativa [4]. Por esta razón la cantidad de pozos en el interior es bien baja comparado a los pozos existentes en el Norte y Sur. La única excepción ocurre en los municipios del interior de Cayey, Cidra, Caguas y Gurabo donde la permeabilidad de la zona permite establecer pozos de extracción moderada.

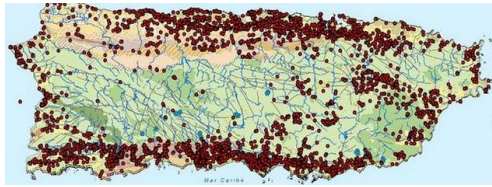


Figura 7

### Pozos Históricos de Puerto Rico

Entre las 3 regiones en esta Región el Riesgo de GWUDI es el más bajo. Esto es debido a la poca porosidad y permeabilidad de las rocas. Además las altas pendientes de las montañas de esta región también disminuyen el riesgo de GWUDI ya que dirigen las escorrentías a las costas. Pero también en esta Región existen Valles los cuales contienen Acuíferos Aluviales. Por tal razón se dividió la Región Central en 2 áreas. Para la Cordillera Central determinamos que si se determina que existe una conexión hidráulica el Sistema analizado en el Centro de la Isla es un GWUDI. De lo contrario, si no existe una conexión hidráulica el agua subterránea es un Non-GWUDI.

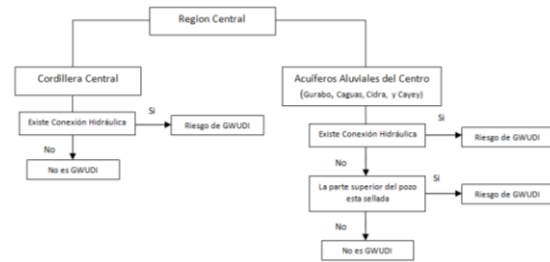


Figura 8

### Flujograma de Región Centro

## Región Sur

La Calidad de Agua de los Acuíferos Aluviales de la Región Sur se ha deteriorado debido al aumento en salinidad provocada por extracciones excesivas. Estas extracciones excesivas provocan el aumento de sólidos disueltos y el movimiento de la interface de agua dulce-salada. Bajo la capa de agua fresca de los acuíferos del sur existen depósitos de agua salobre de origen marítimo los cuales suben si ocurre exceso de extracción. También existen problemas de contaminación de los acuíferos del sur por químicos provenientes de derrames accidentales, escorrentía urbana, disposición de gallinaza, aplicación de fertilizantes y plaguicidas agrícolas, y la disposición de aguas usadas mediante pozos sépticos [9].

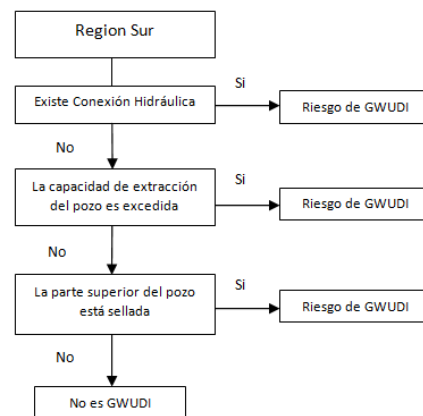


Figura 9

### Flujograma de Región Sur

Para los Acuíferos Aluviales de la Región Sur se tiene que determinar si existe una Conexión Hidráulica. Si existe una conexión hidráulica está bajo riesgo de GWUDI. Si no existe se pasaría al siguiente paso. En el segundo paso se tiene que

determinar si la capacidad de extracción del pozo es excedida. Si se excede la capacidad de extracción del pozo ocurrirá intrusión salina provocando la presencia de sólidos disueltos quedando influenciada. Si es excedida esta bajo riesgo de GWUDI, si no es excedida se pasa al siguiente paso.

## CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La investigación realizada para determinar GWUDI utilizando parámetros hidrogeológicos a base de un flujograma concluyo que la geología de la Región es un factor determinante a la hora de realizar un Estudio Hidrogeológico para determinar GWUDI. Todos los flujogramas de esta Investigación se realizaron a base de la geología de la Región y a base de su historial de contaminación. Todos los Acuíferos de Puerto Rico de una manera u otra están bajo Riesgo de GWUDI, esto debido a la geología de la zona o al mal manejo de contaminantes por el ser humano.

El Acuífero que tiene un mayor riesgo de estar influenciado por aguas superficiales es el Acuífero No Confinado de la Región Norte. Esto se debe principalmente a la geología de la zona, ya que está ubicado en una zona kárstica, pero también se debe al mal manejo de contaminantes por parte del ser humano. El Acuífero Confinado de la Región Norte con solo proteger las zonas de recarga y asegurarnos de que los pozos estén sellados en la superficie podemos reducir grandemente el riesgo de GWUDI. En Estados Unidos se protegen las zonas de recarga de Acuíferos Confinados cerrándolas e identificándolas, en Puerto Rico no. La Región Central no constituye una fuente significativa de aguas subterráneas, sin embargo las fracturas existentes y sus manantiales no han sido investigados a profundidad. La Región Sur se está viendo afectada grandemente por intrusión salina. Esto se debe a la extracción excesiva de los pozos la cual excede su recarga natural. Para remediar esta situación se debe reducir la extracción o se deben implantar pozos de inyección de agua tratada. Todos los pozos que al analizarse bajo estos

flujogramas estén bajo Riesgo de GWUDI, se recomienda que se realice un Estudio MPA.

Algunas ideas de Trabajos Futuros que surgieron durante la Investigación que pueden mejorar los Estudios Hidrogeológicos de Puerto Rico son investigar la ubicación y los efectos de los pozos sépticos en las aguas subterráneas de Puerto Rico. No existen datos de la ubicación de la mayor parte de los pozos sépticos en Puerto Rico. Otra Investigación que se puede realizar es analizar la Región Central y sus fracturas. Algunas de ellas generaron manantiales. Las rocas de origen Volcánico de la Cordillera Central y sus fracturas han sido poco estudiadas. Otro Proyecto que se puede realizar es crear una base de datos de los Sumideros que se encuentran en la Región Karstica. Esta Región tiene una gran cantidad de sumideros, crear una base de datos de la conexión de los mismos podría ser muy útil para estudios hidrológicos, hidrogeológicos y geológicos.

## REFERENCIAS

- [1] J. Torres, "Ground Water Under the Direct Influence of Surface Water (GWUDI)," Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico, 2015.
- [2] Health Authority, "Groundwater under the Direct Influence of Surface Water," Oregon, Estados Unidos, 2014.
- [3] M. Fulkerson y F. Nnadi, "Hydrogeologic Assessment of Groundwater under Direct Influence of Surface Water," 2002.
- [4] F. Quiñones. (2015). *Recursos de Agua de Puerto Rico* [Online]. Disponible: <http://www.recursosaguapuertorico.com>.
- [5] F. Quiñones y S. Torres, "Clima de Puerto Rico," en *Recursos de Agua de Puerto Rico*, 2012. [Online]. Disponible: [http://www.recursosaguapuertorico.com/Clima\\_PR\\_for\\_Web\\_Page\\_2005\\_rev\\_Jan2012.pdf](http://www.recursosaguapuertorico.com/Clima_PR_for_Web_Page_2005_rev_Jan2012.pdf).
- [6] Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, "Condiciones Hidrogeológicas y Estrategias para la Protección de los Acuíferos Superior e Inferior de la Región Norte de Puerto Rico," San Juan, P. R., 2004.
- [7] S. Torres. (2012). "Geología de Puerto Rico," en *Recursos de Agua de Puerto Rico* [Online]. Disponible: [http://www.recursosaguapuertorico.com/Geologia\\_de\\_PR\\_por\\_ST\\_y\\_FQ\\_Rev\\_9Jan12.pdf](http://www.recursosaguapuertorico.com/Geologia_de_PR_por_ST_y_FQ_Rev_9Jan12.pdf).



- [8] I. Padilla, et al. (2011). *Historical Contamination of Groundwater Resources in the North Coast Karst Aquifers of Puerto Rico* [Online]. Disponible: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3999440/>.
- [9] Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, "Condición Hidrogeológica de los Acuíferos de la Región Sur de Puerto Rico y Estrategias para su Restauración," San Juan, P. R., 2003.
- [10] Environmental Protection Authority, "Hydrogeological Assessment (Groundwater Quality) Guidelines," Victoria, Australia, 2006.
- [11] Department of Environmental Quality, "Ground Water under the Direct Influence of Surface Water," Montana, Estados Unidos., 2008.