# Identificación de sitios potenciales de recarga de acuíferos mediante uso de vehículos aéreos no tripulados en la Universidad del Mar *campus* Puerto Ángel

Eduardo Juventino Ramírez Chávez[1]*, Cervando Sánchez Muñoz[1], María del Rosario Enríquez Rosado[1] & María del Rocío Gutiérrez Ortiz[1]

*Resumen*

**En el presente trabajo se identifica la ubicación de las potenciales zonas de recarga de acuíferos dentro del *campus* Puerto Ángel de la Universidad del Mar.** *Esta selección de sitios se obtuvo mediante fotografías aéreas tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (VANT), a partir de las cuales se elaboró una ortofoto a la que se le aplicó una evaluación multicriterio (EMC) y algebra de mapas (AM); con la EMC y AM se generó una zonificación de áreas potenciales de recarga, a partir de la construcción y ponderación de la altura, tipo de roca, tipo de suelo, uso de suelo y porcentaje de cobertura vegetal. Los resultados sugieren que el 24.15 % de esta superficie presenta aptitud Muy Alta y Alta como área de recarga e infiltración al acuífero. Se discuten las ventajas del uso de VANT, del método para orientar los trabajos prospectivos en campo y para definir prioridades de construcción encaminadas a la protección de zonas de recarga de acuífero.*

**Palabras clave:** acuíferos, algebra de mapas, ortofoto, recarga, VANT, UMAR.

*Abstract*

**In this work, the potential recharge zones of aquifers are located inside the Puerto Angel campus of the Universidad del Mar.** *This selection was obtained through aerial photographs taken by an unmanned aerial vehicle (UAV), which were generated with an Orthophoto. The selection was analyzed with multicriteria evaluation (EMC) and map algebra (AM). With the EMC and AM, a zoning of potential recharge areas was generated, considering construction, height, percentage of vegetation cover, type of soil, land use and type of rock. The results suggest that 24.15% of this surface has very high or high aptitude as an area for recharge and infiltration to the aquifer. We discuss the advantages of the use of UAV as the method to guide the prospective works in the field and to define construction priorities aimed at the protection of aquifer recharge zones.*

**Key words:** aquifers, map algebra, orthophoto, recharge, UAV, UMAR.

**Recibido:** 26 de agosto de 2018

**Aceptado:** 01 de octubre de 2018

[1] *Instituto de Ecología, Universidad del Mar campus Puerto Ángel. Ciudad Universitaria, Puerto Ángel CP 70902, Oaxaca, México.*
** Autor de correspondencia: eduardo@angel.umar.mx (EJRC)*

## Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más importantes del planeta y tiene una gran importancia en las actividades antropogénicas; este recurso no es solamente indispensable para la vida y la salud, sino también es de gran trascendencia desde el punto de vista económico y social, por lo que su agotamiento puede comprometer seriamente las posibilidades de desarrollo.

Actualmente se consumen en promedio de 300 L a 500 L de agua al día por persona (CONAGUA, 2016), variando en cada región del país; para poder satisfacer esta demanda se han llevado a cabo la extracción de las aguas subterráneas, además que han sido de relevancia para los usos agrícolas e industriales. En algunos casos, la explotación intensiva de los mantos acuíferos ha provocado descensos importantes en los caudales de ríos y manantiales, ha afectado humedales y ecosistemas o ha producido la degradación de la calidad del agua o intrusión de agua marina en acuíferos costeros.

Debido a esto es necesario identificar áreas que dadas sus características faciliten la infiltración. A dichas zonas se les denomina zonas críticas de recarga de acuíferos. Los factores que afectan la recarga hídrica son (INAB, 2003):

- El clima: Debido principalmente a la cantidad de lluvia y a la evapotranspiración del lugar.
- El suelo: Cuyas características que influyen en la infiltración como la textura, la densidad aparente, el grado de saturación o contenido de humedad y la capacidad de infiltración.
- La topografía: Determina el tiempo de contacto entre el agua y la superficie.
- Los estratos geológicos: La disposición del material geológico puede afectar directamente la cantidad de recarga hídrica.
- La cobertura vegetal: En este factor es necesario considerar la profundidad y densidad de las raíces y la capacidad de retención de la vegetación.
- El escurrimiento: El agua proviene de las precipitaciones en forma de flujos superficiales, subsuperficiales o subterráneos; los cuales son captados por los cauces de los ríos.

El presente trabajo muestra las zonas críticas de recarga de acuíferos dentro de la Universidad del Mar *campus* Puerto Ángel, tomando como criterios: la pendiente, tipo de roca, tipo de suelo, uso de suelo y cobertura vegetal.

## Material y métodos

Área de estudio. - El área de estudio comprende a la Universidad del Mar campus Puerto Ángel, ubicada en las coordenadas extremas -96.501, 15.664 y -96.498, 15.661 (Figura 1).

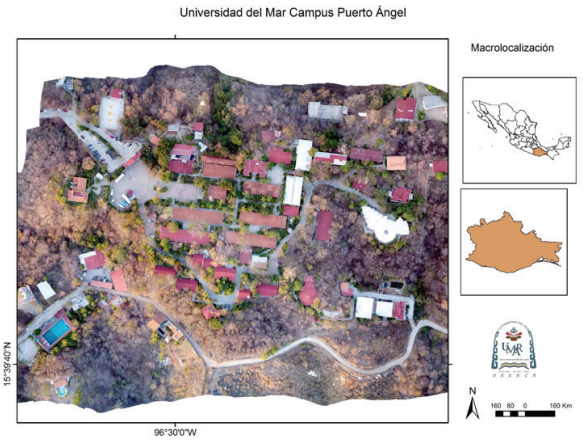


**Figura 1.** Universidad del Mar *campus* Puerto Ángel.

Para llevar a cabo la identificación de sitios potenciales, el estudio se dividió en tres partes: 1) toma de fotografía aérea mediante vehículo aéreo no tripulado modelo Phantom 4 Pro para la generación del mosaico georreferenciado y su correspondiente modelo digital de elevación, 2) recolección de datos en campo y 3) análisis de datos en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica, utilizando ArcGis 10.2.1.

La captura de fotografías aéreas se realizó por una única vez el 10 de enero de 2017, la

toma de datos se efectuó siguiendo la metodología Ramírez-Chávez *et al.* (2013), la cual consiste en realizar un plan de vuelo autónomo en forma de "S" con una sobreposicion entre cada fotografía de 80% en el frente y 70% al costado.

Mediante el software Pix4D se elaboró un mosaico georreferenciado y un modelo digital del terreno con una precisión de más/menos 50 cm con los parámetros en escala de imagen igual a 1, densificación de punto igual a alta y con un sobrelape de 5 imágenes en el 90% del mosaico.

La recolección de datos consistió en un recorrido por el *campus* de la Universidad del Mar. Se tomaron 28 puntos de muestra, de los cuales se registraron sus coordenadas geográficas, altura, porcentaje de cobertura vegetal, tipo de suelo, uso de suelo y tipo de roca; siguiendo la guía propuesta por Matus *et al.* (2009). Las coordenadas geográficas y la altura fueron registradas mediante un GPS mientras los valores de los demás requerimientos fueron ponderados según la Tabla I. Estos datos fueron capturados en una tabla de Excel para ser exportados a ArcMap como un archivo tipo csv.

**Tabla I.** Ponderación asignada a cada parámetro para determinar sitios potenciales de recarga de acuíferos.

| Requerimiento | Posibilidad de recarga | Ponderación |
|---|---|---|
| **Pendiente, %** | | |
| 0-6 | Muy alta | 5 |
| 6-15 | Alta | 4 |
| 15-45 | Moderada | 3 |
| 45-65 | Baja | 2 |
| > 65 | Muy baja | 1 |
| **Tipo de suelo** | | |
| Feozems, Rendzinas, Fluvisoles | Muy alta | 5 |
| Regosoles, Planosoles | Alta | 4 |
| Luvisoles, Yermosoles, Chernozems | Media | 3 |
| Rankers, Cambisoles, Xerosoles, Castañozems | Baja | 2 |
| Litosoles, Vertisoles, Solonchaks, Solonetz | Muy baja | 1 |
| **Tipo de roca** | | |
| Aluvial, Eólico | Muy alta | 5 |
| Arenisca-Conglomerado | Alta | 4 |
| Conclomerado | Media | 3 |
| Andesita, Granodiorita, Riolita toba ácida | Baja | 2 |
| Basalto | Muy baja | 1 |
| **Uso de suelo** | | |
| Bosque de pino. Bosque de encino Bosque pino-encino. Bosque encino- | Muy alta | 5 |
| Pastizal natural. Pastizal inducido | Alta | 4 |
| Agricultura temporal. Agricultura riego | Media | 3 |
| Zona urbana | Baja | 0.5 |
| **Covertura vegetal, %** | | |
| > 80 | Muy alta | 5 |
| 70-80 | Alta | 4 |
| 50-70 | Media | 3 |
| 30-50 | Baja | 2 |
| < 30 | Muy baja | 1 |

A partir del archivo csv se creó un mapa de puntos en ArcMap para posteriormente crear uno para cada requerimiento: pendiente, uso de suelo, tipo de suelo, tipo de roca y cobertura vegetal; con cada uno de éstos se realizó una interpolación usando la herramienta IDW de la caja de herramientas Geostatistical Analyst Tools. Este instrumento consiste en usar los valores dados en un punto en especial para poder predecir un valor en cualquier sitio, basado en el supuesto de que los puntos que se acercan al valor dado son más similares que aquéllos que están más lejos.

Posteriormente se realizó una reclasificación de estos valores asignando la ponderación correspondiente observable en la Tabla I. Cada mapa obtenido, visto como una matriz, se multiplicó por el coeficiente asignado según la ecuación:

$$ZR=[0.27(Pend)+0.23(TS)+0.12(TR)+0.25(CobVeg)+0.13(US)$$

Por último, con la ayuda de la herramienta Geostatistical Wizard, empleando el método Areal Interpolation, se sumaron los mapas (suma de matrices) para obtener el mapa global de sitios potenciales de recarga de acuíferos. El citado método de interpolación se basa en una predicción lineal "kriging" que tiene en cuenta la entrada poligonal de varias formas, presentándose los datos en tres posibles: primero, los datos de Gauss de media sobre los polígonos; segundo, binomial que indica el número de éxitos y el número de ensayos por polígono; tercero, los datos de Poisson que cuentan el número de eventos en un polígono durante un tiempo específico.

## Resultados

Se determinó que en la zona de estudio predominan las áreas donde la pendiente es muy alta (zona azul), lo cual no favorece la recarga de acuíferos (Figura 2). Sin embargo, el tipo de suelo predominante en dicha área es Regosol, dentro de este grupo se incluyen los suelos arenosos costeros (Figura 3) y el tipo de roca presente en la zona de interés es conglomerado, es decir, es moderadamente permeable, semisuave, con regular conexión entre poros; lo que ocasiona que el terreno tenga una posibilidad de recarga media (Figura 4).

La cobertura vegetal varía en el área de estudio. La zona café representa el lugar donde la cobertura vegetal va desde un 50 a un 70% con una posibilidad de recarga moderada. La región azul muestra el área con cobertura vegetal inferior al 30% con posibilidad de recarga muy baja y el sector blanco representa aquellos sitios donde la cobertura vegetal es mayor al 80% con una posibilidad de recarga muy baja (Figura 5).

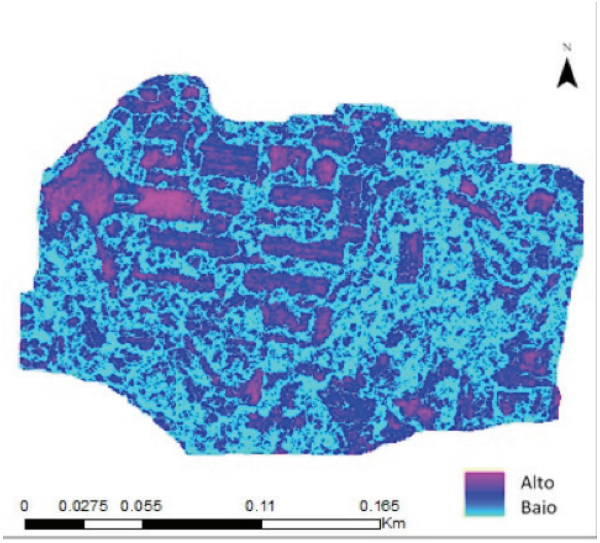


**Figura 2.** Pendiente y microrelieve en la Universidad del Mar, *campus* Puerto Ángel.

**Figura 3.** Tipo de suelo en la Universidad del Mar *campus* Puerto Ángel.

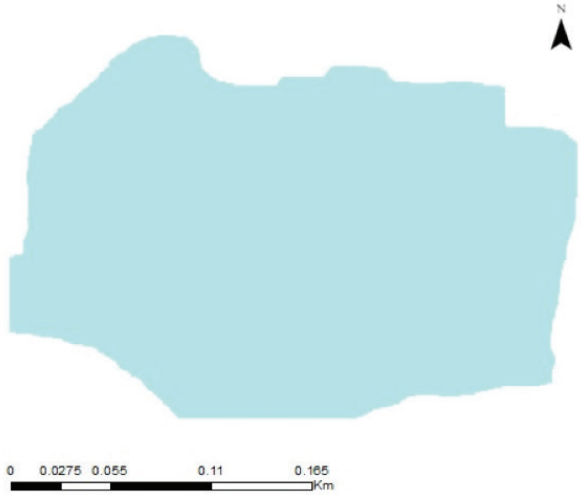


**Figura 4.** Tipo de roca en la Universidad del Mar *campus* Puerto Ángel.

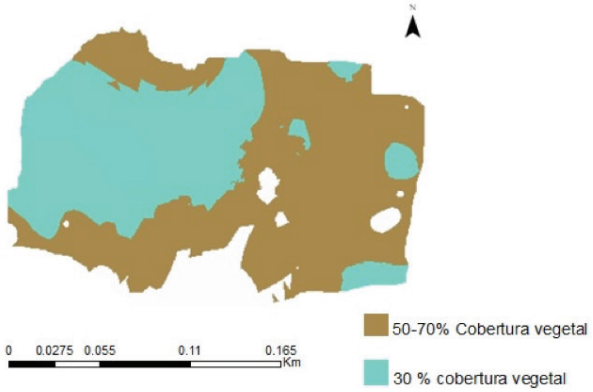


**Figura 5.** Cobertura vegetal en la Universidad del Mar *campus* Puerto Ángel.

El uso de suelo presente en el área de estudio (Figura 6) varía desde zona urbana (superficie roja), que representa los sitios donde se han edificado inmuebles o caminos y acceso con material de construcción como cemento; zona de agricultura de riego (color crema), en la que se han introducido especies de flora utilizadas para ornamenta y zona de pastizal natural o inducido (superficie azul) en donde la vegetación encontrada es propia del lugar.

En la tabla II se muestran los valores de recarga hídrica para el *campus* Puerto Ángel y en la figura 7 se indican los sitios potenciales de recarga de acuíferos, observándose aquéllos con posibilidad de recarga desde muy baja (gris) a muy alta (verde), siendo los sitios de posibilidad de recarga moderada (café oscuro) los que abarcan una mayor superficie del área de estudio.

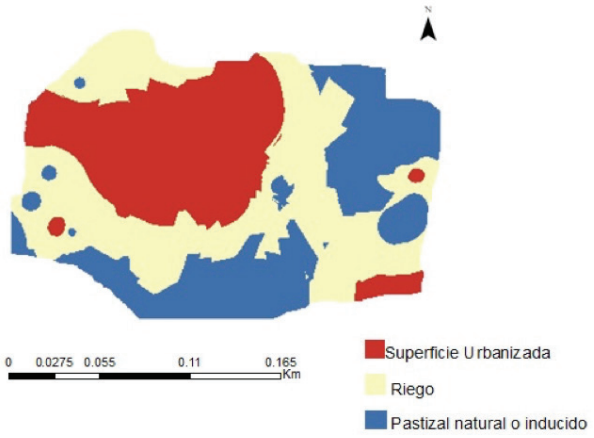


**Figura 6.** Uso de suelo en la Universidad del Mar *campus* Puerto Ángel.

**Tabla II.** Potencial de recarga hídrica.

| POSIBILIDAD DE RECARGA | INTÉRVALO |
|---|---|
| MUY ALTA | 4.1-5.0 |
| ALTA | 3.5-4.09 |
| MODERADA | 2.6-3.49 |
| BAJA | 2.0-2.56 |
| MUY BAJA | 1.0-1.99 |

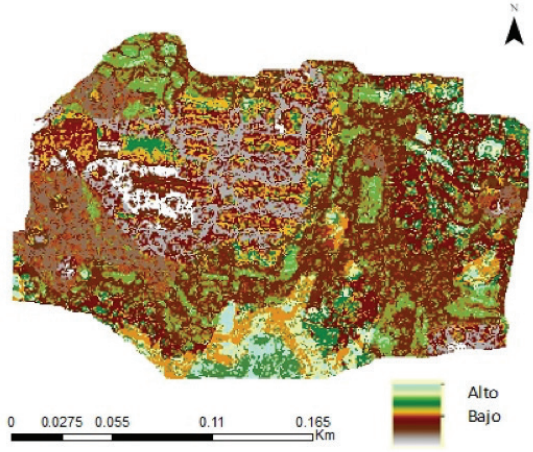


**Figura 7.** Sitios Potenciales de Recarga de Acuíferos en la Universidad del Mar *campus* Puerto Ángel.

## Discusión

Los sitios con pendientes altas o fuertes favorecen el aumento en la velocidad de la escorrentía (Bravo-Peña *et al*. 2016), lo que modifica las condiciones del suelo, la capacidad de recarga y la susceptibilidad a la erosión; por el contrario, en pendientes suaves, el agua se mueve lentamente y permanece por más tiempo en contacto con el suelo lo que favorece el proceso de infiltración (Seiler & Gat 2007), tal como se muestra en los resultados de este trabajo.

Los suelos encontrados en el *campus* Puerto Ángel están compuestos por una textura granular hasta 50 cm de profundidad; como consecuencia retienen pocos nutrientes y afecta su capacidad de retención hídrica. Entre mayor sea la porosidad, el tamaño de las partículas y el fisuramiento del suelo, mayor será la capacidad de infiltración. Las zonas de recarga hídrica deben ser muy permeables para asegurar una alta capacidad de infiltración; es decir, en suelos con textura gruesa, porosos -y por lo tanto, permeables – se dan buenos niveles de recarga hídrica. Por el contrario, los suelos de textura fina, arcillosos, pesados y compactados impiden o dificultan la recarga hídrica. Debido a esto, el tipo se suelo presente en la Universidad del Mar proporciona una posibilidad de recarga alta.

La posibilidad de recarga que no esté bien determinada se debe principalmente a los diferentes porcentajes de cobertura vegetal, pendiente y al uso de suelo; que fueron los parámetros que tuvieron más variación, comparándolos con el tipo de suelo y tipo de roca, resultando ser homogéneos en toda el área de estudio.

La identificación de sitios potenciales de recarga de acuíferos se puede llevar a cabo con una metodología relativamente sencilla y económica; los resultados obtenidos pueden ser una herramienta muy valiosa para llevar a cabo la planeación, acciones de manejo, conservación y protección de dichas zonas antes que éstas sean degradadas o sobre explotadas. En este sentido, los vehículos aéreos no tripulados han venido a facilitar la observación de la tierra, permitiendo tener detalles de zonas relativamente pequeñas, mismas que a través de las imágenes satelitales de acceso libre no se podrían obtener.

Las zonas de aptitud "muy alta" se distribuyeron en el lecho de escurrimientos superficiales intermitentes del área de estudio, donde las condiciones favorecen la infiltración (pendientes medias, vegetación ripiara y pocas construcciones), o bien en áreas de piedemonte localizadas en el sector habitacional. Este resultado sugiere la importancia de los procesos de recarga difusa y lineal en el acuífero de estudio, tal y como se ha demostrado en acuíferos de otras latitudes (Seiler & Gat 2007). Por lo tanto, se puede concluir que el área de estudio es un sitio con posibilidad de recarga moderada.


## Agradecimientos

Agradecemos al laboratorio de SIG y PR de la Universidad del Mar por el espacio y uso de los equipos disponibles.


## Referencias


INAB, I. N. d. B. 2003. *Metodología para la determinación de áreas críticas de recarga hídrica natural. Manual técnico*. Guatemala: CATIE.

Bravo-Peña, L. D. Sáenz-López, L. Alatorre-Cejudo, Á. Priego-Santander, M. Torres-Olaveey & A. Granados-Olivasf. 2016. Identificación de áreas de recarga hídrica en el acuífero Cuauhtémoc (Chihuahua) mediante una evaluación espacial multicriterio. 339-362. *In:* Alatorre-Cejudo, L., C. Bravo-Peña, C. Wiebe-Quintana, M. Torres-Olave, M. Uc-Campos, M. González-León (eds). Estudios territoriales en México: percepción remota y sistemas de información espacial. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez.

CONAGUA. 2016. Estadísticas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México, 282 pp.

Matus, O., J. Faustino & F. Jiménez. 2009. Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Ramirez-Chavez, E., A. Cruz García, A. Lagunas Pérez & O. Reyes Carreño. 2013. Uso de vehículos aéreos no tripulados para la caracterización del paisaje sumergido; Bahía Estacahuite. Ciencia y Mar XIX (51): 35-40

Seiler, K. P., & J. R. Gat. 2007. Groundwater Recharge from Run-off, Infiltration and Percolation. Springer Science & Business Media.