

ANALYSIS OF SOLAR RESOURCE FOR AGRICULTURE PUMPING APPLICATIONS: ENVIRONMENT AND ENERGY IMPACT

Rubio Aliaga, Álvaro ¹; Sánchez Lozano, Juan Miguel ²; García Cascales, María Del Socorro ³; Molina García, Ángel ⁴

¹ Dpto de Ingeniería. Universidad Politécnica de Cartagena, ² Centro Universitario de la Defensa. Academia General del Aire. Universidad Politécnica de Cartagena, ³ Dpto Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos. Universidad Politécnica de

Aiming to reduce greenhouse gas emissions and non-renewable resource dependence, agriculture needs to change its irrigated energy model. In this framework, the integration of renewables emerges as a possible solution for emission reduction and the promotion of local energy resources. A clear example is in the region of La Mancha (Spain), suffering from water scarcity of both surface and ground water. In addition, the relevant demand for fossil fuels that are currently used to pump groundwater from aquifers.

In this scenario, this paper provides technical and geographical data to optimize the implementation of solar pumping installations depending on the type of crop, the water needs and the energy demand. A Geographic Information System (GIS) is proposed as a tool to visualize, represent and analyze geographic data referenced by connecting databases with maps of the study area in order to solve problems of agro-energy planning and management. It is thus a way to facilitate the integration of renewable energy and reduce greenhouse emissions, providing new applications to the GIS tools in the agriculture sector.

Keywords: Renewable Energy Source (RES); Resource optimization; Energy Efficiency (EE); Sustainable Rural Development; Geographic Information Systems (GIS); Reducing CO2 emission.

ANÁLISIS DEL RECURSO SOLAR PARA APLICACIONES DE BOMBEO EN LA AGRICULTURA: IMPACTO MEDIOAMBIENTAL Y ENERGÉTICO

Atendiendo a los objetivos de reducción de emisiones y disminución de dependencia de fuentes fósiles, la agricultura necesita cambiar su modelo energético de regadío, apostando por tecnologías renovables que generen una reducción de emisiones de CO2 y un aprovechamiento de fuentes energéticas locales. Un claro ejemplo se tiene en la Región de La Mancha (España), la cual sufre de una escasez de agua tanto superficial como subterránea, lo que implica una elevada demanda eléctrica actualmente basada en combustibles fósiles. Dicho consumo se emplea mayoritariamente en el bombeo de agua desde acuíferos y pozos.

En este escenario, el presente artículo aporta datos técnicos y geográficos para optimizar la implantación de instalaciones solares de bombeo en función del tipo de cultivo, de las necesidades hídricas y de la demanda energética. Para ello, se propone un Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta para visualizar, representar y analizar los datos geográficos referenciados, conectando mapas con bases de datos del área de estudio con el objetivo de resolver problemas de planificación y gestión agro-energética. Se trata, pues, de facilitar la incorporación de energías renovables y la reducción de emisiones de efecto invernadero, ofreciendo un nuevo campo de aplicación a las herramientas SIG en la agricultura.

Palabras clave: Energías Renovables (EERR); Optimización de recursos; Eficiencia Energética (EE); Desarrollo rural sostenible; Sistemas de Información Geográfica (SIG); Reducción de emisiones de CO2.

Correspondencia: Alvaro Rubio Aliaga - ara10@alu.upct.es/alvaro.rual@gmail.com

Agradecimientos: Este trabajo está financiado por los proyectos TIN2014-55024-P del Ministerio de Ciencia e Innovación y P11-TIC-8001 de la Junta de Andalucía (incluidos en Fondos Feder)

1. Introducción

Durante siglos, la utilización de combustibles fósiles y los cambios de uso en los suelos han modificado las propiedades y procesos naturales de la Tierra. Desde que se tiene constancia de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera y su relación con el aumento de las temperaturas globales (Arrhenius, 1896) (desde 1950 a 2005, el cual se estimó en 0,76°C generalizados), los gases con potencial efecto invernadero han aumentado considerablemente, entre ellos destaca el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), y el óxido nitroso (N₂O). Así, los estudios muestran que, a partir del año 1750, como consecuencia del nacimiento de la era industrial, las concentraciones de CO₂ comenzaron a crecer de manera notable, superando ampliamente los valores anteriores a la época preindustrial (observados en el hielo del ártico) (Petit J. R., 1999) y demostrando que no se trataba en su totalidad de un efecto sólo natural, sino en gran parte debido a la acción del hombre (Figura 1). Así, la concentración de CO₂ en la atmósfera aumentó de un valor en la era preindustrial de unos 280ppm, hasta alcanzar los 379 ppm en 2005. Este aumento se vio favorecido por el incremento en la concentración de otros gases como el metano, que pasó de 0,715 ppb (partes por billón) en la era preindustrial a 1774 ppb en 2005, y el óxido nitroso que pasó de 0,270 ppb a 0,319 ppb en 2005. Por este motivo, y según estudios históricos sobre las concentraciones de CO₂ en la atmósfera en varias épocas de la historia de la tierra, el aumento de la concentración de CO₂ va asociado al aumento de temperaturas, tal y como indica R. Petit en su estudio "*Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*" (R. Petit, 1999). Según las previsiones climáticas actuales se prevé en un futuro próximo que el calentamiento de la tierra seguirá aumentando, en latitudes altas en torno a 0,2°C por decenio (Solomon, 2009).

Desde este periodo preindustrial, y atendiendo a una gran cantidad de estudios publicados al respecto, puede afirmarse que el uso de combustibles fósiles es y ha sido una de las principales causas del aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera. En menor medida, también contribuye a ello el cambio del uso de la tierra, sobre todo el aumento en la concentración de metano, la cual se debe a las actividades humanas (Koerner, 2002) y, especialmente a la agricultura (Faucher, 2006).

Fruto de estos estudios se han detectado cambios significativos a nivel mundial: aumento de intensidad de las tormentas, destrucción de ecosistemas, aumento de la salinidad de los océanos, así como diversos problemas locales. Los suelos se prevé que disminuyan gran parte de sus propiedades y los procesos naturales asociados a los mismos se verán afectados, produciendo una pérdida de materia orgánica. El contenido en agua del suelo se verá también fuertemente influido por este aumento global de temperatura y por consiguiente la disponibilidad de agua. Así, advierten algunos estudios (Moreno, 2005) que el cambio climático desencadenará una degradación de los suelos que provocará la salinización de terrenos agrícolas en zonas secas. Este proceso conlleva una desertificación de las zonas, agudizada a través de las alteraciones que se han provocado como consecuencia del cambio climático. Estos suelos que se encuentran sometidos a una desertificación son más propensos a sufrir olas de calor, posibles incendios o una mayor erosión debido a la desaparición de la cubierta vegetal que los protege. Desembocando en una disminución de la productividad agrícola del terreno, lo que conduce de manera paralela a problemas sociales y económicos. Así, estos cambios visibles redundarán inevitablemente en la economía agraria, ya que la producción agrícola de muchas regiones tropicales y mediterráneas se verá disminuida de manera notable. En esas zonas, es posible que disminuya de manera acusada el rendimiento de tierras que hoy son perfectamente fértiles, reduciendo el área cultivable de algunos países (Weiss, 2011).

Por tanto, el cambio climático se encuentra estrechamente ligado a efectos indirectos en la interrelación entre la degradación de los suelos y las precipitaciones, y se hace necesario proponer soluciones que eviten problemas socio-económicos y alarguen la utilización de estos campos como elemento sustancial de la sociedad y como vía de atenuación de los cambios climáticos (Moreno, 2005).

Haciendo un recorrido por orden cronológico de las acciones más relevantes que se han tomado, destacar como inicio el Protocolo de Kioto suscrito en 1992. Un acuerdo con carácter vinculante con el objetivo de reducir las emisiones de 6 gases invernadero (CO_2 , N_2O y CH_4 entre otros) en un porcentaje de un 5% de manera global entre 2008 y 2012 y tomando como punto de partida las emisiones de 1990. Este protocolo se prorrogó hasta 2020. A día de hoy, el nivel de cumplimiento de Kioto es difuso, sobretodo porque Kioto nunca logró vincular plenamente a los países desarrollados y mayores emisores, los cuales alegaban dificultades jurídicas, políticas y ambientales.

En Europa, el grado de cumplimiento fue de una reducción del 22,6%, por encima del 5% inicial, en las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a los niveles de 1990. España, por el contrario, ha sufrido un aumento de sus emisiones y sólo ha podido cumplir con las exigencias de Kioto tras reiterados avisos y a través de la adquisición de derechos de emisión. Las emisiones españolas en 2014 por sectores son las siguientes: energía 77,9%, agricultura 11,1%, procesos industriales 6,9% y residuos 3,8%. A finales de 2015, en la cumbre mundial sobre el clima que se celebró en París (COP21) (ONU, 2015), se acordó un nuevo protocolo que sustituyese al de Kioto a partir de 2020, y cuyo objetivo será conseguir que la temperatura del planeta no supere un aumento de más de 2°C respecto a la era preindustrial (Naciones Unidas [COP21], 2015), clave para limitar el calentamiento global. Uno de los pilares de las políticas internacionales para mitigar el cambio climático se fundamenta pues en la reducción de las emisiones de CO_2 antropogénicas, promoviendo un uso más eficiente de la energía acorde con los objetivos establecidos.

Dentro de los diferentes sectores implicados en la mitigación del cambio climático (Blum, 2010), puede afirmarse que el sector de la agricultura contribuye de manera relevante a los cambios detectados en las concentraciones de CO_2 en la atmósfera, al aglutinar tanto necesidades hídricas como energéticas. Teniendo en cuenta la alta presencia que este sector tiene en toda la franja mediterránea, este artículo tiene como objetivo el estudio del sector agrícola regado a partir de aguas subterráneas, así como el impacto sobre las emisiones de CO_2 (Gallaher, 2009) que posee cada una de las diferentes soluciones comerciales actuales que podrían implementarse. El estudio se aborda a través de un proceso SIG en el que se trabaja con capas de diferentes características del territorio. Se compararán las emisiones de CO_2 (Schiel K., 2016) en la agricultura asociadas al bombeo de aguas subterráneas con equipos diésel con respecto a nuevos modelos energéticos basados en la energía solar. Esta solución es extrapolable a otras regiones que posean una agricultura basada en el agua subterránea de un acuífero y que es necesario bombear. En este artículo se propone, pues, una transformación del modelo energético de fuentes fósiles a soluciones basadas en el recurso solar, con aplicación para el bombeo de aguas subterráneas de uso agrícola.

El artículo se estructura en las siguientes secciones; primeramente, se describe la metodología propuesta basada en un sistema de información geográfica (SIG) donde estimar las emisiones de CO_2 de la agricultura. Este sistema permite comparar las emisiones de varias tecnologías diésel (actual) y solar (propuestas a futuro). Posteriormente se incluyen resultados de un caso concreto en España, característico de agricultura dependiente del bombeo de aguas subterráneas que actualmente extrae el agua en base a equipos eléctricos diésel. Finalmente se discutirán los resultados de esta zona y se aportarán las conclusiones en base a datos de reducción de emisiones estimados.

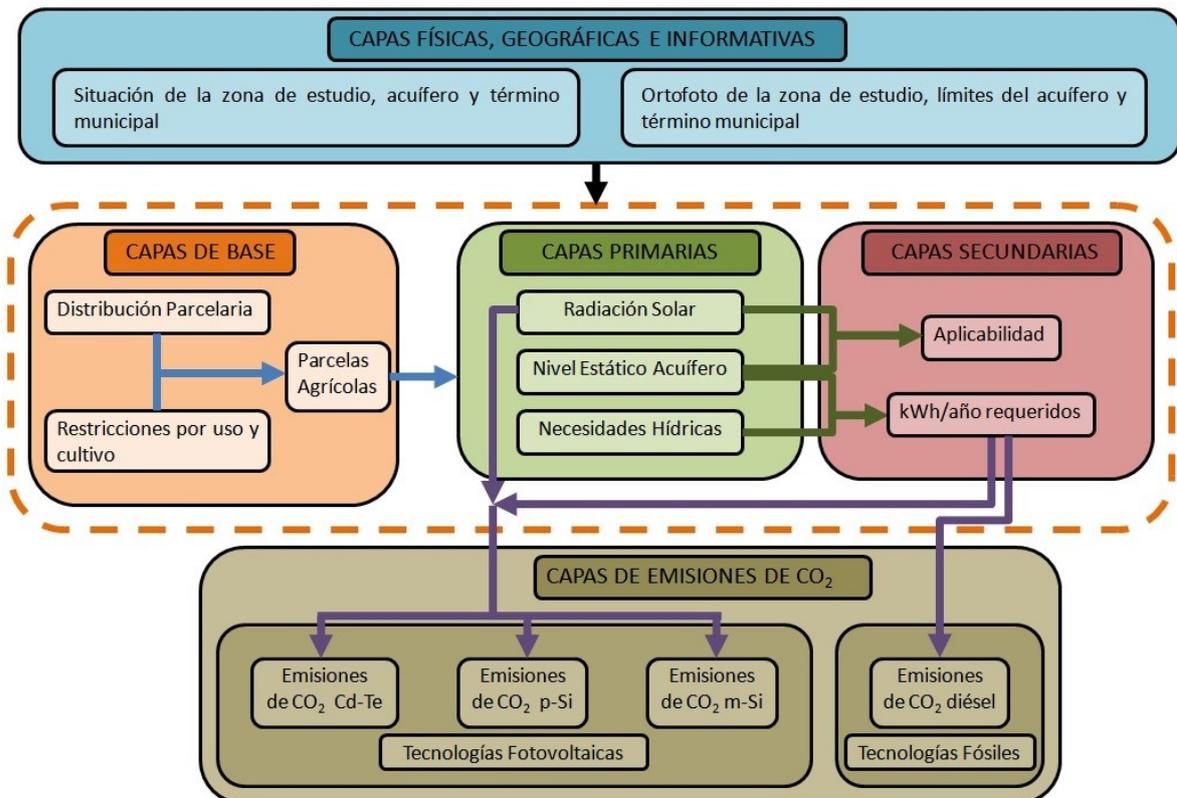
2. Metodología

2.1 Descripción General

La metodología propuesta tiene como objetivo estimar las emisiones de CO₂ de cada una de las parcelas agrícolas regadas mediante bombeo procedente de aguas subterráneas, comparando los diferentes modelos energéticos que se planteen. Como herramienta de trabajo se ha optado por un paquete de software basado en técnicas Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permite estructurar los datos de forma gráfica por capas, jerarquizar la información y cumplir con sus funciones de cartografía digital con la finalidad de resolver problemas y retos sobre el territorio (Sánchez-Lozano J, 2012).

Esta metodología permite proponer modelos de evaluación y planificación de las distintas soluciones a implementar sobre el área de estudio, planificando así impactos medioambientales, uso de recursos naturales o análisis de actividades humanas. A partir de la herramienta SIG se ha estudiado el territorio en función de la distribución de varias características: (i) hídricas (nivel freático, necesidades de agua de los cultivos) y (ii) energéticas (radiación solar, demanda energética y emisiones de CO₂), siguiendo un modelo similar de análisis aplicado anteriormente en otros estudios (Mariam G. Salim, 2012) donde podemos identificar cinco bloques o etapas:

Figura 1: Metodología utilizada en el proceso SIG.



Fuente: Elaboración Propia.

-Bloque de Capas Físicas, Geográficas e Informativas: proporciona información que permite conocer en cualquier momento la situación de la zona de estudio.

-Bloque de Capas de Base: ofrece una indicación detallada de las parcelas, los usos y los cultivos en cada una. Esta información permite conocer e identificar las parcelas de uso agrícola de regadío con aguas subterráneas.

-Bloque de Capas Primarias: contiene información acerca de diferentes aspectos físicos y medio ambientales como son la radiación solar, hídrica, y de profundidad del acuífero.

-Bloque de Capas Secundarias: resulta de operar las Capas Primarias y proporciona información de aplicabilidad y requerimientos energéticos de cada parcela agrícola.

-Bloque de Capas de Emisiones de CO₂: proporciona una estimación de emisiones de CO₂ en función de las soluciones o las tecnologías energéticas adoptadas para el bombeo de agua.

2.2 Descripción de la Aplicación SIG: Desglose de Capas

Para aplicar la metodología propuesta son necesarias las siguientes capas estructuradas en el proceso que se detallada en la Figura 1:

Capas Físicas, Geográficas e Informativas

- *Capa de Situación de la zona de estudio y acuífero.* Esta capa tiene la finalidad de dar conocimiento de la ubicación zona de estudio y del acuífero.
- *Capa de Ortofoto de la zona de estudio y límites del acuífero.* Aunque no aporte información específica vinculante con el resultado final, sí que desde esta capa se aprecia la orografía y se diferencian notablemente las zonas de regadío y las de secano.

Capas de Base

- *Capa de Parcelas Rústicas.* Es necesaria esta capa para poder describir de forma individualizada cada parcela asentada sobre el acuífero, independiente de su uso agrícola, urbano, industrial o que pertenezcan a otro grupo (zonas protegidas, infraestructuras, comunicaciones...). A su vez, sirve de base para conocer las características físicas que requiere este estudio.
- *Restricciones por uso y cultivo.* El análisis abordado en el presente artículo se restringe exclusivamente a parcelas cuyos cultivos son de regadío mediante agua subterránea. Por tanto, los cultivos de secano, así como los regadíos de aguas superficiales son restricciones impuestas. También lo son los usos de suelo no agrarios, como el industrial, urbano, construcciones diseminadas, infraestructuras, comunicaciones, transportes, zonas protegidas, cauces o zonas lacustres.
- *Capa de Parcelas Agrícolas.* Una vez que se han aplicado las restricciones por uso y por cultivo, se genera esta capa donde solamente se muestran aquellas parcelas que tienen un uso agrícola y que sean de regadío exclusivo de aguas subterráneas. Esta nueva capa servirá de base en el resto del estudio.

Capas Primarias

- *Capa de Radiación Solar Anual Media.* Se realiza un análisis del recurso solar incidente, con los datos anuales de cada una de las estaciones meteorológicas que se encuentran cerca de la zona de estudio, elaborando un mapa de distribución de radiación solar (kWh/m^2 y día) (Yan-wei Sun, 2013).
- *Capa de Piezometría del nivel Estático del Acuífero.* Se ha realizado una capa con un SIG del área del acuífero incluyendo la profundidad (nivel estático) a la que se encuentra el acuífero en diferentes puntos (Medidas del Acuífero 23, Visor de Recursos Hídricos Subterráneos, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2014-2015).
- *Capa de Necesidades Hídricas.* En esta capa quedan reflejados los consumos hídricos de cada uno de los cultivos integrados dentro de la zona de estudio (m^3 anuales).

Capas Secundarias

- *Capa de Aplicabilidad.* Dicha capa, como relación entre la radiación media y la profundidad del acuífero, muestra un índice de aplicabilidad asociado a la relación entre radiación solar incidente y cota del nivel freático. Este índice recoge el potencial que tiene el recurso solar en dicha zona expresado en función de la obtención de agua mediante bombeo solar. Esta capa indica en qué ubicaciones, para el mismo uso (irrigación de un número equivalente de hectáreas), la inversión sería mayor o menor (Rubio-Aliaga A., 2015).
- *Capa de kWh/año requeridos.* Esta capa se obtiene a partir de los datos de la *Capa de Piezometría del nivel estático del acuífero* y de la *Capa de Necesidades Hídricas*, así como de los datos de extensión. Recoge la energía anual demandada por cada parcela en función del cultivo existente; es decir, la energía que debe suministrar un generador al sistema para elevar una cantidad de agua determinada. Los datos mostrados responden a la siguiente expresión,

$$E_r = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \cdot H_t, \quad (1)$$

siendo E_r es la energía requerida en kWh , η el rendimiento (volumétrico, mecánico y eléctrico) con un valor de 70%, ρ la densidad del agua con un valor de 1000 kg/m^3 , g el valor de la intensidad del campo gravitatorio ($9,8 \text{ m/s}^2$), Q el caudal anual, h la profundidad del acuífero y H_t es las horas totales de funcionamiento anual.

Capas de Emisiones de CO_2

- *Capa de Emisiones de CO_2 con equipos diésel.* Esta capa muestra las emisiones generadas por un equipo diésel para un cultivo de riego determinado, construida a partir de los datos de la *Capa de kWh/año requeridos* y de la información $en \text{kgCO}_2/kWh$ emitidos mediante equipos diésel.
- *Capa de Emisiones de CO_2 con tecnología fotovoltaica mono-silicio.* A través de esta capa es posible conocer las emisiones de CO_2 emitidas por el bombeo solar con tecnología basada en módulos solares de silicio mono-cristalino. Se llega a ella con la *Capa de kWh/año requeridos* y la *Capa de Radiación Solar Anual Media* e información de gCO_2/kWh emitidos mediante este tipo de tecnología solar.

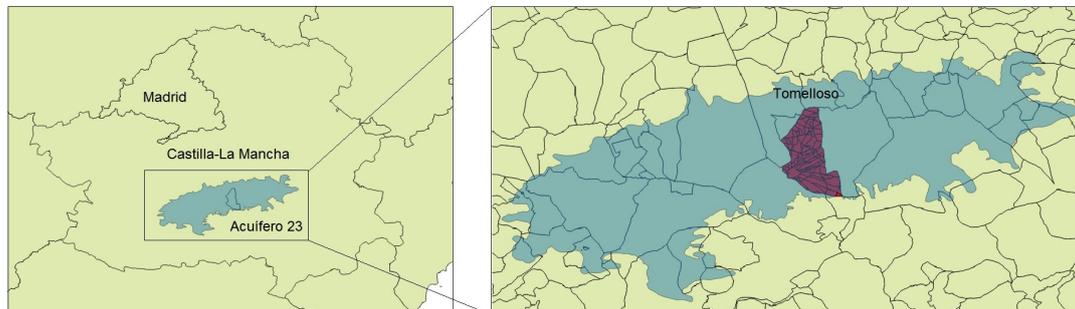
- *Capa de Emisiones de CO₂ con tecnología fotovoltaica poli-silicio.* En esta capa se dan a conocer las emisiones de CO₂ emitidas por el bombeo solar con tecnología solar de silicio policristalino. Para obtener esta capa son necesarias la *capa de kWh/año requeridos* y la *capa de Radiación Solar Anual Media* e información de gCO₂/kWh emitidos mediante este tipo de tecnología solar.
- *Capa de Emisiones de CO₂ con tecnología fotovoltaica Cd-Te.* Esta última capa de emisiones muestra las emisiones de CO₂ emitidas con tecnología solar de Teluro de Cadmio para el riego solar agrícola con aguas subterráneas. Esta capa se construye con la *Capa de kWh/año requeridos* y la *Capa de Radiación Solar Anual Media* e información de gCO₂/kWh emitidos para esta de tecnología solar.

3. Caso de Estudio

3.1 Problemática y descripción geográfica

En este caso se pretende aplicar esta metodología al área agrícola dependiente del Acuífero 23 (Mejías, 2012), localizado en España, concretamente en el centro de la región de Castilla La Mancha (Figura 2). Se ha tomado el área agrícola del término municipal de Tomelloso, un municipio que se asienta sobre la cuenca sedimentaria responsable del sistema kárstico del Acuífero 23 (IGME,2004)(ITGE 1989), siendo representativo de la agricultura manchega y de las necesidades energéticas e hídricas de los cultivos de regadío, que representan a 7071,1 Ha. Cuenta con una profundidad media del acuífero de 25,04 m y un tamaño medio de parcela de 3,1 Ha.

Figura 2: Capa de situación de la zona de estudio, acuífero y término municipal.



Fuente: *Elaboración Propia.*

Este término posee varias zonas diferenciadas, la parte norte (o Vega entre el Záncara y el Córcoles) de suelos arenosos y una profundidad muy somera que la hace apta para cultivos de elevadas necesidades hídricas. La parte central con suelos más calizos aptos para el viñedo y, por último, la parte sur más alta con el acuífero más profundo, con suelos más arcillosos, y donde están la mayoría de los cultivos de secano. Su clima viene determinado por un clima mediterráneo continentalizado asociado a veranos secos y calurosos con elevada insolación, inviernos fríos con un periodo de heladas, y primaveras y otoños suaves y húmedos (Pérez González, 1998). A día de hoy la precipitación existente en la zona pasa por periodos variables con una orientación descendente, mientras que la temperatura media está aumentando, elevando el riesgo de desertificación considerablemente a consecuencia del cambio climático.

Desde el punto de vista energético, es una agricultura fuertemente dependiente de los combustibles fósiles, ya que una subida de los precios energéticos deja a este sector en una situación muy débil competitivamente condicionando la viabilidad económica de esta zona agrícola. Desde el punto de vista de radiación solar es una zona privilegiada, teniendo un índice de radiación solar importante que puede generar hasta 4900 horas de sol anuales. En cuanto al recurso hídrico, ha habido una falta de control en las extracciones del acuífero y a causa de ello éste ha ido descendiendo su nivel freático llegando a descensos de 2,3m/año(IGME, 2004).Actualmente se va tomado conciencia de la situación, teniendo presente que el mantenimiento o mejora del nivel del acuífero repercute positivamente en la economía del agricultor(Mejías Moreno, M, 2012).Al mismo tiempo, la bajada del nivel freático obliga al agricultor a poner más recursos económicos para costear la energía necesaria para elevar el agua, cada vez a mayor profundidad, generando mayores emisiones de CO₂ en este sector. Dentro de este escenario, el presente artículo analiza el recurso solar como una alternativa para mejorar la situación en el entorno rural, estudiando el potencial de conversión en función de los cultivos y sus necesidades, valorando su viabilidad y aportando información relevante en materia SIG, generando mapas de emisiones de CO₂ y demostrando la reducción, en la agricultura, de las emisiones de CO₂. Atendiendo a la metodología expuesta anteriormente y aplicándola al presente caso de estudio, en el Anexo A se recogen los pasos más significativos para estimar la reducción de emisiones, ya en formato cartográfico.

3.2 Resultados y Discusión

Una vez determinado la energía necesaria para elevar el agua que requieren los cultivos (*Capa de kWh/año requeridos*), la Radiación incidente (*Capa de Radiación Solar Anual Media*) y conociendo las emisiones medias tomadas en todo el ciclo de vida para cada tipo de tecnología energética es posible construir las cuatro capas de emisiones que se muestran en la Figura 3. Entendiendo como ciclo de vida la suma de emisiones de cada instalación y sus componentes, así como su fabricación y su tratamiento final (Fthenakis V., 2011) (Kazuhiko, 2001) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos sobre el Análisis de Ciclo de Vida por tecnologías (Emisiones de CO₂).

Tecnologías	Módulo gCO ₂ -eq/kWh	BOS (Inversor cableado,etc) gCO ₂ -eq/kWh	Frame (Estructura) gCO ₂ -eq/kWh	Total gCO ₂ -eq/kWh
Silicio Monocristalino*	38	6	3	47
Silicio Policristalino*	36	6	3	45
Teluro de Cadmio*	12	6	3	18
Tecnologías	Emisiones (funcionamiento) gCO ₂ /kWh	Emisiones (fabricación y retirada) gCO ₂ /kWh	Total gCO ₂ /kWh	
Diésel**	265	513	778	

Fuente: * *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency(IEA)* y ** *(Gagnona, 2002)*.

Los resultados de la Tabla 2 resumen las emisiones resultantes (medias y totales) del modelo propuesto con una herramienta SIG, emitidas por el conjunto de parcelas del término municipal que riegan del acuífero (7071,1 Ha) actualmente con equipos diésel. A su vez el estudio demuestra hasta qué punto es posible ahorrar emisiones de CO₂ en la

atmósfera desde la agricultura con el cambio propuesto de una fuente de origen fósil a una renovable de tipo solar. Arrojando unos resultados para según qué tipo de tecnología solar puede llegar a reducciones de emisiones muy significativas respecto de las emisiones con equipos diésel.

Tabla 2: Resultados de Emisiones de CO₂.

	Emisiones Diésel	Emisiones Mono-Si	Emisiones Poly-Si	Emisiones Cd-Te
Media (kgCO ₂ /Ha o kgCO ₂ -eq /Ha)	715,90	43,22	41,38	16,54
Total (Ton CO ₂ /año o Ton CO ₂ -eq/año)	5062,20	305,61	292,60	116,95
Reducción(Ton CO ₂ /año o Ton CO ₂ -eq/año)		4756,58	4769,59	4945,24
Porcentaje de reducción (%)		93,96%	94,21%	97,68%

Fuente: Elaboración Propia.

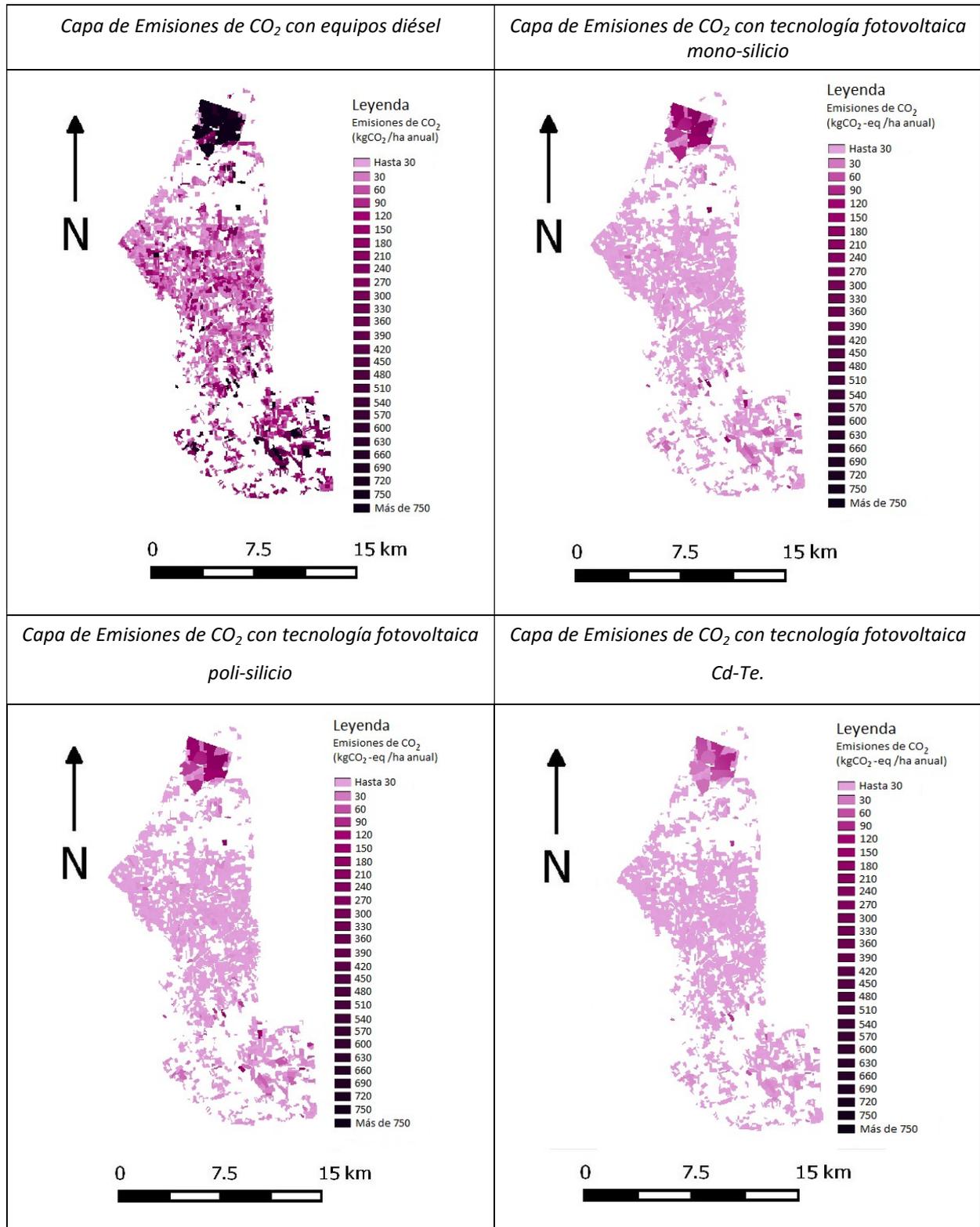
La Tabla 3 recoge los resultados globales al extender la solución propuesta a todos los municipios del acuífero, estimando el potencial de reducción de emisiones de CO₂ a la atmosfera procedentes del bombeo de agua en la agricultura, y valorando así el impacto que ocasionaría al llevar a la práctica las acciones pertinentes para mitigar estos efectos mediante la integración de fuentes renovables. De hecho, el mantenimiento sostenible del acuífero depende tanto del ámbito socioeconómico como del ambiental, ya que los resultados aquí expuestos se verían sustancialmente modificados como consecuencia de que el acuífero bajase su nivel freático.

4. Conclusiones

Las estrategias de sostenibilidad del medio ambiente y optimización del consumo energético pasan, entre otras vías, por la integración de recursos renovables, siendo la agricultura uno de los sectores más estratégicos al combinar tanto necesidades hídricas como energéticas. Desde esta perspectiva, este artículo se ha centrado en la reducción de CO₂ en regadíos de bombeo con aguas subterráneas a partir de la sustitución de fuentes fósiles por instalaciones solares. Se ha mostrado que las diferentes tecnologías de energía solar (Mono-Si, Poly-Si y Cd-Te) pueden reducir considerablemente las emisiones de CO₂ de la agricultura (en un 93,96%, 94,21% y 97,68% respectivamente cada tecnología), con aplicación directa en zonas donde el bombeo es requerido, causando a su vez impactos positivos en la socio-economía rural.

Este artículo aporta una herramienta como punto de partida para estimar las emisiones generadas en la agricultura de regadío, estructuradas a través de un proceso basado en un modelo SIG. La metodología es exportable a cualquier zona agrícola con bombeo de agua del subsuelo. Como trabajo futuro se propone valorar el grado de agrupación de parcelas para riego de aguas subterráneas con bombeo solar de un mismo depósito de acumulación. Observando a su vez, la reducción de CO₂ y los beneficios económicos, con un análisis de toma de decisiones buscando la eficiencia hídrica y energética.

Figura 3: Resultados de Emisiones de CO₂.



Nota: Se observa la graduación de colores entre las zonas con mayor relación emisiones por hectárea (tono más oscuro) y como disminuye (tono más claro).

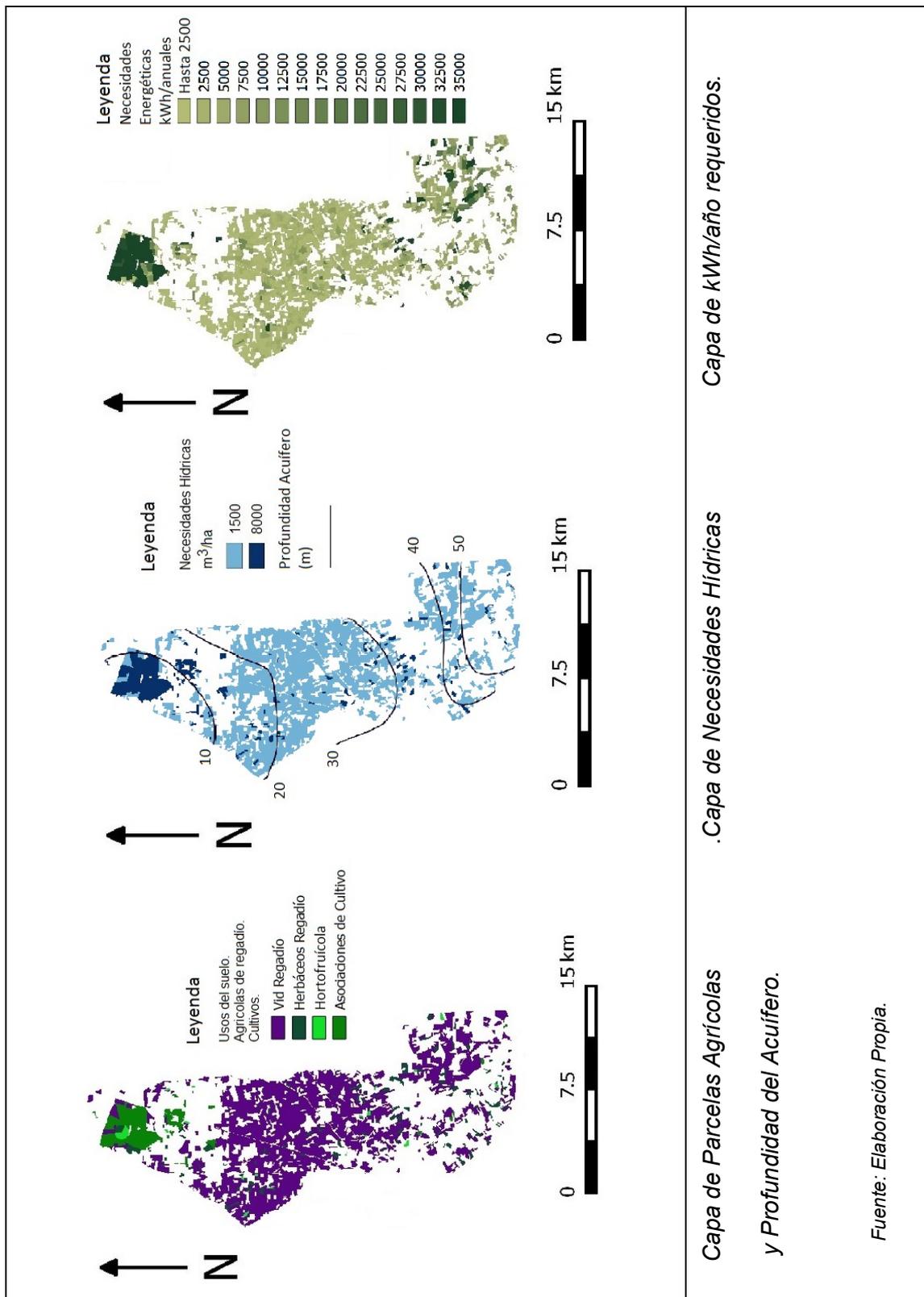
Fuente: *Elaboración Propia.*

5. Referencias

- Arrhenius, S. (1896). On the influence of carbonic acid in the air upon the temperatura of the ground. *Philosophical Magazine Series 5*. Vol. 41. Nº 251. Pág. 237-276.
- Basildo Martín, R. M. & López Nieva, P. (1998). Aproximación bibliográfica a los Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Ordenación del Territorio y los Recursos Naturales. *Revistas Científicas Complutenses. Anales de Geografía de la Universidad Complutense nº 18*: 319-335.
- Blum P., Campillo G., Münch W., Kölbl T. (2010). CO₂ savings of ground source heat pump systems-A regional analysis. *Renewable Energy Vol. 35*: 122-127.
- Faucher, C & Bastien, J. (2006). Renewable Energy and Agriculture: GHG mitigation and Waste Management Strategy. *EIC Climate Change Technology. IEEE*. Pag 1-6.
- Frayssignes J. (2011). The concept of “agro-energy district”: a pertinent tool for the sustainable development of rural areas. 51st Congress of the European Regional Science Association, Barcelona.
- Fthenakis V., Kim H. C., Frischknecht R., M. Raugei, P. Sinha, M. Stucki, (2011), Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency(IEA) PVPS Task 12, Report T12-02:2011.
- Fthenakis V. & Alsema E. (2006). Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: Progress in photovoltaics: Research and applications. *Prog. Photovolt: Res. Appl. vol. 14*:275–280.
- Gagnona L., Belanger C., Uchiyamac Y. (2002). Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001. *Energy Policy nº 30* 1267-1278.
- García Rodríguez, M. & Llamas Madurga, M. (1996). Características geológicas del borde Suroccidental de la Unidad Hidrogeológica 04.04 y su influencia sobre la hidrogeología de Las Tablas de Daimiel. Dept. de Geodinámica Fac. de CC Geológicas. Universidad Complutense de Madrid. *Geogaceta 20*[6].
- Gallaher M. & Delhotal K. & Petrusa J. (2009). Estimating the potential CO₂ mitigation from agricultural energy efficiency in the United States. Springer Science.
- Instituto Geológico y Minero de España, IGME. (2004, Julio). Evolución Piezométrica en la Unidad Hidrogeológica 04.04. Informe número 4. Pág. 11-15.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE. (2010). Plan de Acción Nacional de Energías Renovables de España (PANER) 2011–2020. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.
- Instituto Tecnológico Geominero de España , ITGE (1989). Descripción del acuífero de La Mancha Occidental. Madrid.
- Kazuhiko Kato, Takeshi Hibino, Keiichi Komoto, Seijiro Ihara, Shuji Yamamoto, Hideaki Fujihara.(2001). A life-cycle analysis on thin-film CdS/CdTe PV modules & Solar Energy Materials & Solar Cells vol.67: 279-287.
- Koerner B.& Klopatek J. (2002). Anthropogenic and natural CO₂ emission sources in an arid urban environment.*Environmental Pollution vol. 116*: 45-51.
- López Sanz, G. (1993 Noviembre). El Acuífero 23 de la Mancha Occidental y el Acuífero 24 del Campo de Montiel: Funcionamiento, Gestión, Problemática y Alternativas. Universidad de Castilla-La Mancha. UCLM. Área de Economía Española e Internacional. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales (Albacete).
- Mariam G. Salim (January 2012). Selection of groundwater sites in Egypt, using geographic information systems, for desalination by solar energy in order to reduce greenhouse gases. *Journal of Advanced Research. Volume 3, Issue 1, Pages 11–19. Egypt.*
- Mejías Moreno, M. & López Gutiérrez J. & Martínez Cortina L. (2012). Características hidrogeológicas y evolución piezométrica de la Mancha Occidental. Influencia del periodo húmedo 2009-2011. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

- Moreno Rodríguez, J.M. et al. (2005). Evaluación Preliminar de los Impactos en España por efecto del Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente Gobierno de España y Universidad de Castilla La Mancha (UCLM). Proyecto ECCE-Informe Final.
- Naciones Unidas (ONU). Convención Marco sobre el Cambio Climático. Conferencia de las Partes. (COP21). París, diciembre de 2015.
- Naredo, J.M. & Campos, P. (1980). Los balances energéticos de la agricultura española. España. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España.
- Neshat A., Pradhan B. (May 2014). Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. Resources, Conservation and Recycling Volume 86, Pages 74–86. Malaysia.
- Ondrekab J., Inga Rüsigena M., Stoberb I., Czurdaa K. (2007). GIS-supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany- Possibilities and limitations. Renewable Energy vol. 32:2186-2200.
- Pérez González, M.E. & Sanz Donaire, J.J. (1998). Clima y microclima de La Mancha Húmeda. Revistas Científicas Complutenses. Anales de Geografía de la Universidad Complutense, nº 8: 239-256.
- Petit J. R., Jouzel J., Raynaud D. et al. (June 1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature 399, 429-436.
- Rubio-Aliaga A., García-Cascales M. S., García A. M., Sánchez-Lozano J. M., Sistemas de información geográfica para optimización e integración de energía solar fotovoltaica en zonas agrícolas con dificultades energéticas e Hídricas, XIX Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos Granada.
- Sánchez-Lozano J. M. & García-Cascales M. S. & Cavas-Martínez F. & Lamata M.T. (2012, Julio). Base de datos mediante SIG para la búsqueda de ubicaciones óptimas de instalaciones de energías renovables. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia.
- Schiel K., Baume O., Caruso G., Leopold U. (2016). GIS-based modelling of shallow geothermal energy potential for CO₂ emission mitigation in urban areas. Renewable Energy Vol.86: 1023-1036.
- Solomon, S. et al (feb. 2009). Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. PNAS. No 6. Vol 106. Pag 1704-1709).
- Weiss, C. & Bonvillian W.B. (Sept 2011). Global Obstacles to disruptive innovation in sustainable agriculture and energy. Science and Innovation Policy. Atlanta Conference On. 2011. Pág: 1-9.
- Yan-wei Sun, Angela Hof, Run Wang, Jian Liu, Yan-jie Lin, De-wei Yang. (2013). GIS-based approach for potential analysis of solar PV generation at the regional scale: A case study of Fujian Province. Energy Policy vol. 58: 248-259.

Anexo A. Estimación de reducción de emisiones



Capa de Parcelas Agrícolas y Profundidad del Acuífero. .Capa de Necesidades Hídricas . Capa de kWh/año requeridos.

Fuente: Elaboración Propia.