

Cambio tecnológico en el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la España de la segunda mitad del siglo XX. Madurez e iniciativa estatal

F. Javier Martínez Rodríguez
Universidad de Almería

Resumen

El Plan Nacional de Obras Hidráulicas de 1933 no contempló el potencial del aprovechamiento de las aguas subterráneas, jugando estos recursos hídricos durante la segunda mitad del siglo XX un papel trascendental en el desarrollo de la agricultura española. Las razones que motivaron que inicialmente no se prestara atención de una manera decidida a la explotación de estas aguas respondieron de forma sustancial a un bloqueo de tipo tecnológico. La sucesión de una serie de mejoras en los sistemas de elevación y en las técnicas de perforación de sondeos durante la segunda mitad del siglo XIX y la primera del XX permitieron que en España se alcanzara a comienzos de la década de los cincuenta la madurez tecnológica en el empleo de los recursos subterráneos. Esta situación, conjuntamente con el cambio de dirección que sufrió la política agraria española y el nuevo escenario internacional, propició su consideración como una fuente importante de dotación de recursos hídricos con los que incrementar la superficie regable del país. El papel del Estado, fundamentalmente a través del Instituto Nacional de Colonización, jugó un papel trascendental para lograrlo.

Palabras clave: Agricultura, aguas subterráneas, tecnología, Estado.

Códigos JEL: N54, O33, Q16, Q25.

Abstract

The National Program for Hydraulic Works of 1933 did not take into account the potential of using groundwater, but these water resources played a major role during the second half of the Twentieth Century in the development of Spanish agriculture. The reason why groundwater was not considered in the Program was a technological blockade. A series of improvements in water raising and well drilling techniques during the second half of the Nineteenth Century and the early Twentieth Century made Spain possible reaching the technological maturity in the use of groundwater in the early fifties. This situation, together with the new lines of the Spanish agricultural policy and a new international scenario, favored its consideration as an important source of water supply to increase the irrigated area of the country. Primarily through the National Institute of Colonization, the State played a relevant role in achieving this goal.

Key words: Agriculture, groundwater, technology, State.

JEL Codes: N54, O33, Q16, Q25.

Cambio tecnológico en el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la España de la segunda mitad del siglo XX. Madurez e iniciativa estatal

[Fecha de recepción del original: 25-05-2014; versión definitiva 31-08-2014]

F. Javier Martínez Rodríguez

Universidad de Almería

1. Introduction

Tras el pionero Plan Provisional de Canales y Pantanos de 1902 o Plan Gasset, cuyo desarrollo fue intensificado por los Planes de 1909, 1916 y por el incluido en la ley de Fomento de la Riqueza del Reino de 1919; el Plan Nacional de Obras Hidráulicas de 1933, considerado la culminación sobre el papel del regeneracionismo hidráulico, afrontó por primera vez de una manera decidida la falta de recursos hídricos en el Levante peninsular desde Castellón a Almería¹. El Plan de 1933 pretendía la derivación de caudales desde los ríos Tajo y Guadiana para la irrigación de las provincias de Valencia, Alicante, Murcia y Almería, así como la del río Ebro hacia Castellón, siendo el cultivo del naranjo el que se trató de fomentar por encima del resto debido a su carácter exportador. Este plan de obras tan solo incluyó dos actuaciones relacionadas con el aprovechamiento de las aguas subterráneas: en una primera etapa del plan, se contemplaron alumbramientos en el río Guadalfeo; y para una segunda etapa, el alumbramiento de aguas en la provincia de Almería². También para la Cuenca Sur de España, se mencionaban como obra a estudiar por los servicios, y a eliminar en su caso, el desagüe de minas en la provincia de Almería para nuevos regadíos y mejora de los existentes, que podría ser entendida como una actuación de aprovechamiento de aguas subterráneas, pues la presencia de elevados niveles freáticos en diversas explotaciones de la provincia condicionaba su viabilidad técnica³.

Sorprende que este ambicioso y riguroso plan de obras hidráulicas de 1933 no considerara el potencial del aprovechamiento de las aguas subterráneas para lograr su

¹ Ministerio de Obras Públicas (1933), pp. 141-143, Tomo I. “Toda esta zona es la que hay que beneficiar en una parte, redimir en otra y transformar por completo en la totalidad, incorporándola en conjunto a una función económica transcendental”.

² Ministerio de Obras Públicas (1933), p. 242, Tomo I.

³ Destacar también las referencias al aprovechamiento de aguas subterráneas incluidas en *Ibid.*, p. 212 Tomo II: “Tampoco habrán de desestimarse como recursos las aguas freáticas y subterráneas, cuyo valor en caso de penuria puede ser extraordinario. Recordemos a este tenor los titánicos esfuerzos realizados por varios generaciones en la cuenca baja del Almanzora y en otros puntos de la provincia de Almería..., permitiendo como por milagro a la población del país vivir arraigada a tan inhóspitos lares, simbolizados bien por su parva flora de cactus y chumberas”.

objetivo de incrementar la superficie regable de España y especialmente la del Levante, dada la importancia que estos recursos habían tenido para solventar la situación de bloqueo que experimentaba la agricultura de regadío en la segunda mitad del siglo XIX⁴, pues eran utilizados casi la práctica totalidad de los recursos hídricos capaces de ser aprovechados por la hidráulica tradicional⁵. Este desbloqueo tuvo lugar gracias a: (1) la mecanización de los aprovechamientos materializada en la aparición de nuevos sistemas de impulsión, (2) el empleo del acero como material de construcción de los ingenios de elevación y (3) el uso de recursos energéticos industriales (no animales), lo que permitió ampliar la disponibilidad de agua y extender la superficie irrigada.

A pesar de no ser tenidos en cuenta por el Plan de 1933, poco después, a partir de la segunda mitad del siglo XX, estos recursos subterráneos jugarían un papel trascendental en el desarrollo de la agricultura española y en especial en algunas de las zonas más productivas en términos de rentabilidad económica. La superficie total de regadío mediante aguas subterráneas se incrementó entre 1955 y 1985 de tal manera que superó las nuevas superficies de riego con aguas superficiales habilitadas por los proyectos estatales de expansión del regadío⁶. En 1972 la superficie regada por pozos y sondeos alcanzaba ya las 359.316 ha, aunque Murcia (1966) situaba esta cifra en 560.000 ha a finales de 1966, y en 1982 ascendía a 749.074 ha⁷, muy por encima de las 125.816 ha irrigadas con estos recursos en 1916⁸. Según datos del Ministerio de Agricultura, en el año 2000 se estimaba que aproximadamente el 30% de la superficie de cultivos de regadío en España empleaban aguas subterráneas para satisfacer la demanda⁹. En la demarcación hidrográfica del Júcar, en la se incluye la mayor parte de la Comunidad Valenciana y territorios de las provincias de Albacete, Cuenca y Teruel, para el total de la demanda las aguas subterráneas suponen un 48%¹⁰. En la demarcación de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, que abarca zonas de las provincias de Almería, Granada y Málaga, este porcentaje alcanza un 46% del total de la demanda¹¹, suponiendo en los subsistemas de explotación situados en la provincia de Almería un 63%¹² del total de los recursos hídricos destinados a regadío. En la demarcación del Segura superan el 35% del total¹³.

⁴ Véanse Calatayud (1993) y Sánchez (1997).

⁵ Sánchez (1997), p. 117: "...desde un punto de vista energético, la hidráulica tradicional sería la manifestación de las posibilidades de regadío de una agricultura orgánica, que no hace uso de recursos energéticos industriales como los combustibles fósiles y la mecanización...". A esta limitación energética habría que sumar la ausencia de grandes infraestructuras de regulación y transporte que permitieran la transferencia de recursos hídricos desde zonas excedentarias.

⁶ Calatayud y Martínez (1999), p. 15.

⁷ Calatayud y Martínez (1999), p. 28.

⁸ Ministerio de Fomento (1918), tomo II, p. 399.

⁹ Ministerio de Medio Ambiente (2000), p. 290.

¹⁰ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014a), p. 175 Anejo 3.

¹¹ Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (2012). p. 225, Anejo IV.

¹² Elaboración propia a partir de Anejo VI de Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (2012). Se han considerado los subsistemas de explotación III-3, III-4, IV-1, IV-2, V-1 y V-2.

¹³ Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014b), p. 75, Anejo 6.

Las razones que motivaron que el Estado dejara en manos de los particulares y no prestara atención de una manera decidida a la explotación de las aguas subterráneas como fuente de recursos hídricos para cumplir con su objetivo nacional de extensión del regadío en España, hasta la segunda mitad del siglo XX, respondieron de forma sustancial a un bloqueo de tipo tecnológico, que impedía el aprovechamiento de los acuíferos profundos. A esta situación de bloque tecnológico España sumaría durante la década de los cuarenta las deficiencias de su política agraria y la precariedad de sus relaciones comerciales con el extranjero.

La evolución experimentada en la segunda mitad del siglo XIX y la primera del XX en las tecnologías propias de la captación de aguas subterráneas, así como su relación con las de la industria del petróleo, permitirán establecer un paralelismo con parte del modelo conceptual del cambio tecnológico planteado por Nathan Rosenberg, en concreto en relación a las interdependencias tecnológicas, que según el autor pueden surgir de la complementariedad, de los efectos acumulativos de mejoras menores o de relaciones interindustriales¹⁴.

2. Hacia la madurez tecnológica en los sistemas de elevación

Dejando a un lado los sistemas de elevación de aguas subterráneas accionados por el hombre, la noria es sin duda el artefacto elevador que con mayor profusión ha sido empleado en la península ibérica desde la ocupación musulmana hasta bien avanzado el siglo XX, como exhaustivamente han analizado Calatayud y Martínez¹⁵. La escasa capacidad de elevación de volúmenes de agua de las norias¹⁶ hacía que su uso se asociara a pequeños regadíos, siendo habitual en muchas regiones de la península que cada regante contara de manera particular con una¹⁷.

Las modificaciones constructivas introducidas en la segunda mitad del siglo XIX en el mecanismo de las norias lograron mejorar su rendimiento energético, permitiendo: (1) ampliar las profundidades de elevación, pasando de los 4-6 metros de las de madera¹⁸ hasta los 30 metros de las de acero¹⁹; y (2) que la fuerza motriz para su accionamiento pudiera ser suministrada, ya en el siglo XX, también por motores de gasolina, gasoil, gas pobre, aceites pesados y eléctricos. En estos casos la rueda de agua de la noria era accionada por dos juegos de engranajes, integrados por ruedas dentadas rectas y una polea accionada por una correa desde el motor²⁰.

¹⁴ Vegara (1994), p. 14.

¹⁵ Calatayud y Martínez (1999) y (2005).

¹⁶ Existían otras tipologías de norias, como las denominadas artes, alta, de corona, de rosario, etc. Véase Montenegro (1894), pp. 134-142.. El modo de funcionamiento y las partes de la noria se definen en Echarry (1876), p. 196.

¹⁷ En Matallana (1951), p. 8: "...la vida del regante y su familia puede decirse va ligada a la del viejo y esquelético jumento que gira en la plataforma de la noria o artefacto de elevación de agua, de un modo automático y cansino, y al que muchas veces hay que ayudar personalmente-para que no sucumba en la empresa-, con esfuerzo físico tan penoso, que muy bien podría decirse que en estos regadíos se riega, más que con el agua, siempre escasa, de que disponen, con el sudor copioso que cuesta alumbrarla".

¹⁸ Echarry (1876), p. 201.

¹⁹ Ferrer (1936), p. 88.

²⁰ Ferrer (1936), p. 89.

Para las elevaciones de recursos subterráneos desde mayores profundidades se empleaban bombas de émbolo o pistón, fundadas en la acción impulsora del vaivén de este elemento dentro de un cilindro hueco describiendo un movimiento rectilíneo alternativo. Estas bombas se clasifican atendiendo a su principio de funcionamiento dentro de la familia de las de desplazamiento positivo o volumétricas. Cuando la elevación del agua se produce al ascender el émbolo este tipo de bombas se denominan aspirantes y si lo hace al descender reciben el nombre de impelentes, existiendo algunas de tipo mixto que impulsan el fluido en el ascenso y en el descenso del émbolo. También se distinguen entre bombas de simple o doble efecto, siendo discontinua la extracción del agua en las primeras y continua en la de doble efecto. El accionamiento de estas bombas se realizaba empleando todo tipo de recursos energéticos: tracción humana y animal, el viento, máquinas de vapor y todo tipo de motores, desde combustión interna hasta eléctricos. Que la acción impulsora se produzca por el movimiento rectilíneo de vaivén del pistón hizo que estas bombas se acoplaran de manera muy satisfactoria con las máquinas de vapor e hizo que fueran muy habituales a finales del siglo XIX y comienzos del XX. También los molinos de viento metálicos o molinetas muy extendidos en este periodo, especialmente en los Estados Unidos, empleaban este tipo de bombas. Respecto a su accionamiento mediante caballerías destacar el privilegio de invención de la bomba de regulador de Antonio Montenegro, instalada por primera vez en mayo de 1869 en Pozuelo de Alarcón a una profundidad de 30 m²¹, capaz de “conciliar la bondad del tiro de la noria, en cuanto a la comodidad, con la sencillez de la bomba de un solo cuerpo”, llegándose a disponer en La Roda (Albacete) y Pozáldez (Valladolid) a profundidades de 60 m²².

La necesidad de asegurar que entre el lugar de ubicación de conjunto cilindro-émbolo y el nivel del agua a elevar hubiera una distancia menor de ocho metros obligaba a la colocación del impulsor en el interior de los pozos profundos, siendo necesario que estos tuvieran dimensiones importantes para albergarlos y permitir su revisión y mantenimiento. Esta cuestión implicaba que los pozos en los que se instalaban estas bombas debían ser excavados mediante medios manuales. Para solventar estos inconvenientes se desarrollaron diseños específicos de bombas de émbolo de menores dimensiones que podían instalarse en pozos de reducido diámetros, como las fabricadas por Letestu o Downie²³, aunque su uso no llegaría nunca a generalizarse. La dificultad de instalación de las bombas de émbolo, su complejidad constructiva y su mal comportamiento con aguas cargadas de arenas hizo que su uso para riego se fuera restringiendo paulatinamente desde comienzos del siglo XX a determinadas situaciones especiales, como elevaciones de muy pequeño caudal y grandes alturas, siendo sustituidas por las bombas centrífugas²⁴.

Las bombas centrífugas se encuadran atendiendo a su principio de funcionamiento dentro de la tipología de las bombas rotodinámicas, basadas en el intercambio de cantidad

²¹ *La Ilustración Española y Americana (01-10-1872)*, p. 592.

²² Montenegro (1894), p. 147.

²³ Véase Mesa (1934), pp. 221-224.

²⁴ Milano (1914), p. 5.

de movimiento entre la bomba y el fluido. En esencia, se trata de una máquina hidráulica compuesta por un impulsor con álabes (rodetes), que accionado desde el exterior a través de un eje transmite al líquido la energía necesaria para obtener una presión determinada²⁵. Fueron inventadas en 1689 por el físico Denis Papin²⁶ y son el tipo de bomba más utilizado en la actualidad en el mundo, habiendo desplazado completamente a las de desplazamiento positivo en la elevación de aguas. Su gran velocidad de funcionamiento y su movimiento giratorio permitían su acoplamiento directo a los motores eléctricos, siendo esta una de las principales causas de su gran difusión desde los inicios del siglo XX, unida en muchos casos a la extensión de las redes eléctricas en el territorio, fundamentalmente, en la segunda década del siglo²⁷. Otras razones generales de su éxito son: su pequeño tamaño y peso; su gran seguridad de marcha y servicio; sus mínimos elementos de desgaste; y ser silenciosas y sin vibraciones en su funcionamiento. En relación a su instalación en pozos, incluso los primeros modelos de eje horizontal, presentaban las ventajas de: necesitar poco espacio en el pozo; su reducido coste respecto a las de émbolo; no requerir vigilancia durante su funcionamiento; al ser su acoplamiento directo al motor no presentar elevadas pérdidas de energía, salvo en las bombas verticales cuando el motor se sitúa separado del cuerpo de la bomba; ser su rendimiento adecuado; y ser sencillo regular el caudal impulsado²⁸. Uno de los principales problemas para el empleo de este tipo de bombas en pozos a comienzos del siglo XX, hasta que se desarrollaron diseños más específicos, radicaba en el hecho de que su altura máxima de aspiración²⁹ se sitúa entre 6,5 y 7 metros, lo que obligaba a la bajada de la bomba en el caso de descenso de niveles piezométricos del acuífero captado, problema este de difícil solución en caso de pozos con cámara lateral en profundidad para albergar la bomba y el motor, y menos complejo de solucionar cuando las bombas se instalaban sobre bancadas³⁰ en la sección del pozo. No era menor problema el ascenso de estos niveles del agua en los pozos, pues podían producir la inundación del motor en el caso de estar acoplado a la bomba. Pronto se concibieron sistemas que permitían el funcionamiento separado de bomba y motor mediante correas y ejes, debiéndose colocar la bomba en una bancada a menor profundidad. Los problemas que acarreaban en los pozos con cámara lateral la subida de niveles hizo que en muchas ocasiones estas cámaras se separan del pozo, evitando su inundación, en las denominadas cámaras impermeables o exentas.

Sin disponer de información estadística que permita evaluar la distribución de cada tipo de bomba en España, parece evidente que las centrífugas irían desplazando progresivamente a las de émbolo desde comienzos del siglo XX, viéndose intensificado

²⁵ Bombas Ideal (1974), p. 5.

²⁶ Grundfos (2004), p. 8.

²⁷ Según Calatayud y Martínez (2005), pp. 94-95, las bombas eléctricas pasaron en España de menos de 1.000 unidades en 1916 a 10.068 en 1932.

²⁸ Lupiani (1964), p. 56.

²⁹ Se conoce como altura de aspiración la distancia entre el nivel del agua en el pozo y la entrada al cuerpo de la bomba.

³⁰ Las bancadas, normalmente de acero, consistían en unas vigas horizontales empotradas en sus extremos en las paredes del pozo sobre las que se instalaban las bombas.

este fenómeno de sustitución por el desarrollo de la red eléctrica y la generalización de los motores eléctricos³¹.

El accionamiento de las bombas centrífugas se realizaba inicialmente con máquinas de vapor y motores de combustión interna (gasolina, gasoil, gas pobre, gas pesado etc.)³², haciendo girar el eje de la bomba mediante la conexión al motor con una correa de cuero o de materiales derivados del caucho. Estos motores contaban con volantes de inercia que permitían estabilizar la velocidad de giro de la bomba y, por tanto, el caudal bombeado. El empleo de estos sistemas motrices quedó posteriormente relegado únicamente a situaciones en las que no se disponía de energía eléctrica, ya que de disponer de ella para accionar una bomba centrífuga “la solución perfecta es el motor eléctrico”³³. Aun en la actualidad en determinadas zonas de la península es habitual encontrar bombas centrífugas funcionando con motores de combustión interna, al carecer de red eléctrica y no ser rentable contar con un grupo electrógeno generador de electricidad para el funcionamiento del motor.

En la instalación de bombas centrífugas en pozos accionadas por máquinas de vapor o por motores de combustión interna era necesario acceder físicamente hasta ellos para su marcha-paro. Por el contrario los motores eléctricos podían ser arrancados a distancia. El tamaño y elevado peso de los primeros imponía su disposición en cámara lateral, obligando a los operarios a llegar hasta ellos mediante una escala vertical fijada a las paredes del pozo, de elevada peligrosidad, o mediante una galería inclinada con escalones o una escalera helicoidal que desembocaban en la cámara de bombeo, soluciones estas que aumentaban la inversión inicial. Para evitar la necesidad de bajar en los pozos para arrancar y parar los motores, así como los problemas de inundaciones ocasionados por eventuales subidas del nivel del agua, durante las primeras décadas del siglo XX se desarrollaron distintos sistemas de transmisión mediante correas y poleas que consiguieron que el motor pudiera estar instalado en superficie y la bomba en el interior del pozo con la consiguiente complejidad de funcionamiento, que aumentaba con la profundidad, y la reducida eficiencia mecánica de los sistemas de transmisión del movimiento giratorio del motor³⁴. Con motores eléctricos, el conjunto motor-bomba también podían instalarse directamente sobre bancadas metálicas en la vertical del propio pozo, lo que simplificaba considerablemente las obras a ejecutar.

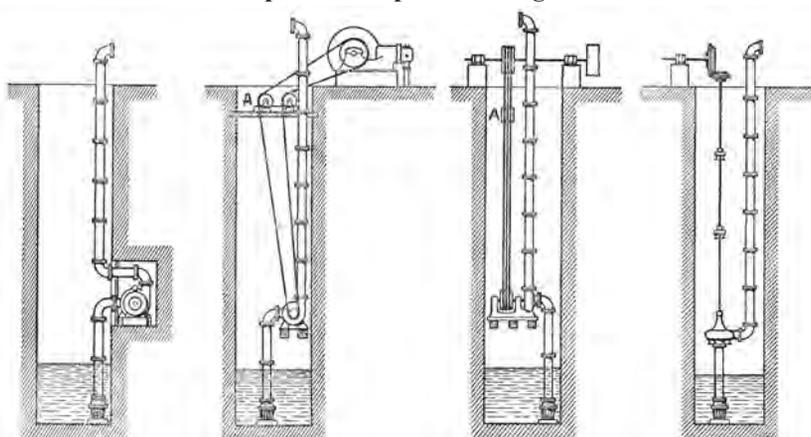
³¹ En las publicaciones de la época aparecen ciertas contradicciones al respecto. Mientras Pi Suñer (1922), p. 3, señalaba que las bombas más conocidas y generalizadas eran las de émbolo, mientras que las modernas centrífugas eran menos empleadas, con anterioridad en Milano (1914), p. 5: “Hace veinte años la bomba centrífuga era considerada en el arte del ingeniero como cantidad casi depreciable, pero desde entonces ha sido tan cuidadosamente estudiada, que hoy es la más empleada”. De ambas afirmaciones parece más verosímil la segunda.

³² En Calatayud y Martínez (1999) y (2005) se analiza la distribución por tipología y evolución de los distintos sistemas motrices en la primera mitad del siglo XX en España, además de su distribución en las distintas provincias españolas.

³³ Lupiani (1964), p. 73.

³⁴ Para distintos esquemas de funcionamiento de bombas centrífugas en pozos véase Pi Suñer (1922), p. 18.

Figura 1. Distintos sistemas de instalación de bombas centrífugas instaladas en pozos de captación de aguas subterráneas



Fuente: Pi Suñer (1922).

El siguiente avance tecnológico en el funcionamiento de las bombas centrífugas empleadas en pozos consistió en la eliminación de los complejos sistemas de correas y poleas de accionamiento de los cuerpos de bomba situados en profundidad, que eran movidos por la fuerza motriz procedente de los motores colocados en superficie, siendo sustituidos por un eje de transmisión de acero macizo guiado por unos cojinetes colocados en las paredes a distintas alturas del pozo. El giro del eje se lograba gracias a dos ruedas troncocónicas dentadas, que transformaban el giro en horizontal del motor en el giro vertical del eje. Estos sistemas comenzaron a ser empleados en los EEUU desde la primera década del siglo XX y presentaban las ventajas de una mayor facilidad de transmisión para grandes profundidades y permitir bajar con facilidad las bombas, además de poder trabajar sumergidas en caso de niveles elevados³⁵. Uno de los principales inconvenientes de este sistema era la obligación de lubricar los cojinetes-guía del eje vertical, además de las pérdidas de rendimiento mecánico cuando los ejes verticales eran muy largos. Esta tipología de transmisión por eje vertical también se empleaba en bombas con motores eléctricos, instalándose el motor en superficie y con su eje en posición vertical, eliminándose los efectos perniciosos de tener el motor eléctrico en el fondo del pozo sometido a un ambiente húmedo. Desde un punto de vista tecnológico, el cuerpo de bomba aún no había sufrido una evolución significativa, habiéndose modificado únicamente la posición de funcionamiento de su eje de horizontal a vertical. Teniendo en cuenta que en la situación más favorable para las bombas centrífugas, con las de tipo de eje vertical, la sección del pozo debería albergar al menos la tubería de impulsión y el eje de la bomba con sus cojinetes-guía, además de requerir el acceso hasta ellos de los operarios para su mantenimiento, se puede afirmar que el grado de evolución de la

³⁵ Pi Suñer (1922), pp. 19-20.

tecnología de bombas para impulsión de agua subterráneas aun no permitía la ejecución de pozos de reducido diámetro para la instalación de una bomba, siendo aún necesario ejecutarlos de forma manual y con diámetros mayores de 1.000-1.200 mm.

La búsqueda de nuevos sistemas de elevación para pozos profundos perforados mediante maquinaria, empleadas hasta la fecha en la industria del petróleo y en la búsqueda de aguas artesianas, que permitieran la instalación de las bombas a mayor profundidad y en secciones de reducido diámetro, propició que a finales de la primera década del siglo pasado comenzaran a aparecer en los EEUU diseños basados en hacer descender el eje vertical de accionamiento desde el motor instalado en superficie hasta la bomba situada en profundidad por el interior de la tubería de impulsión, situándose los cojinetes guía también en el interior de la citada tubería. Esta solución incorporaba, además de un menor espacio necesario, la gran ventaja de que la refrigeración y lubricación de estos rodamientos se lograba con la circulación de la propia agua elevada. En noviembre de 1908, Mahlon E. Layne presentaba en la Oficina de Patentes de los EEUU el que puede considerarse el primer diseño de bomba centrífuga vertical multietapa de diámetro reducido y eje vertical de transmisión hasta el motor de superficie por el interior de la tubería de impulsión³⁶. Poco después fueron solicitadas otras patentes que mejoraban el diseño inicial de Layne, destacando la registrada en marzo de 1909 por los hermanos Chapman para la compañía American Wells Works³⁷, lo que deja claro los esfuerzos en esta línea de la industria. La situación del motor en superficie permitía el funcionamiento de estas bombas tanto con motores eléctricos, para los que fueron diseñadas, como con motores de explosión mediante el empleo de correas o con cajas de engranajes que convertían el giro en dirección horizontal del eje del motor de combustión interna en giro vertical del eje de la bomba. Este funcionamiento con motores de combustión interna dotó de gran versatilidad a estas bombas para su empleo en zonas rurales en las que no se disponía de suministro de electricidad.

Sin lugar a dudas, las bombas verticales supusieron una ruptura tecnológica en el aprovechamiento de las aguas subterráneas a nivel mundial, ya que con esta solución constructiva se estaba posibilitando el empleo de bombas centrífugas en captaciones de más de 100 metros de profundidad con mínimas necesidad de espacio (diámetros de entubado de pozo entre 150 y 500 mm), lo que evitaría la necesidad de excavar pozos de gran diámetro, abriría el camino a la ejecución de este tipo de captaciones con maquinaria de perforación empleada hasta ese momento únicamente para el aprovechamiento de aguas artesianas y permitiría el aprovechamiento de acuíferos que no podían ser explotados anteriormente. Durante la segunda década del siglo XX se empezaría a extender el uso de esta tipología de bombas por los EEUU³⁸, considerándose que a finales de los años treinta esta tecnología estaba ya “finalmente perfeccionada y

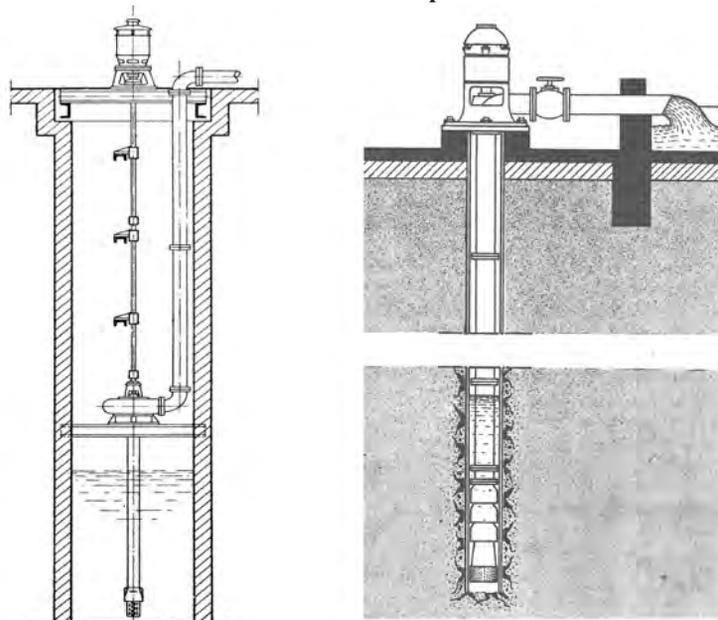
³⁶ Layne (1911). A este inventor se deben gran cantidad de mejoras técnicas relacionadas con las captaciones profundas de petróleo y agua introducidas en el siglo XX, entre las que destacan, además de los sistemas de bombeo, sus diseños de entubados filtrantes para sondeos (*well-screens*).

³⁷ Chapman (1920).

³⁸ *Revista de Obras Públicas* (1914).

comercializada³⁹. La evolución seguida por las bombas centrífugas horizontales hasta llegar a la invención de la bomba vertical de pozo es un claro ejemplo de los efectos acumulativos de mejoras menores, definidos por Rosenberg como parte importante del desarrollo de una tecnología.

Figura 2. A la izquierda, bomba vertical con cojinetes-guía externos. A la derecha, bomba vertical con cojinetes-guía y eje por el interior de la columna de impulsión.



Fuente: Lupiani (1964) y Murcia (1953).

La primera referencia conocida de la comercialización de estas bombas verticales de reducido diámetro en España data del año 1925, en el que la marca americana Worthington, con larga tradición en el mercado nacional de bombas centrífugas, comercializara sus modelos Axiflo⁴⁰ y Coniflo⁴¹. También existe constancia de la

³⁹ Ackerman y Löf (1959), p. 281.

⁴⁰ Wolfe (2010), p. 9, menciona que la bomba Axiflo estaba diseñada para pozos con diámetros comprendidos entre 150 y 500 mm en los que el agua se encontrara como máximo a 60 m de la superficie. Su capacidad de bombeo se situaba entre 380 y 22.700 litros por minuto.

⁴¹ Worthington (1925), (1926a) y (1926b). Señalar como en la información comercial recogida en Worthington (1926b) al hablar de la bomba Coniflo se decía: “Especialmente construida para pozos profundos, anchos y estrechos y para pozos artesianos. La única que puede trabajar continuamente sumergida. Solo un tubo se introduce en el pozo. Para profundidades de hasta 120 metros y caudales superiores a 1.500 litros por minuto”. Wolfe (2010), p. 9, menciona que las bombas del modelo Coniflo comercializadas en Méjico tenía una capacidad de bombeo entre 750 y 13.250 litros por minuto.

fabricación en 1930 de bombas verticales de esta clase en la provincia de Valencia bajo la marca comercial de Ventury⁴². Se desconoce por el momento el grado de implantación de este tipo de sistemas de bombeo con anterioridad al uso de los mismos por parte del Instituto Nacional de Colonización desde finales de los años cuarenta en adelante.

Del análisis de distintos proyectos de captaciones de agua subterráneas del Instituto Nacional de Colonización (INC) en el periodo de tiempo comprendido entre 1939 y finales de los años cuarenta subyace la idea del conocimiento por parte de los técnicos de la existencia y ventajas de las bombas verticales, considerándolas las más adecuadas para los pozos que estaban proyectando, pero afirmando que “existe una dificultad que no hemos podido vencer, que es la imposibilidad de su adquisición, a menos que se importen del extranjero”⁴³. Esto motivó que hasta comienzos de los años cincuenta, en que fue posible importar con normalidad las bombas verticales de los EEUU⁴⁴, las captaciones de aguas subterráneas del INC siguieran ejecutándose con bombas centrífugas horizontales dispuestas en profundidad en cámaras exentas o sobre bancada⁴⁵. Podría decirse que Worthington fue la marca americana por excelencia de bombas verticales empleadas por el INC, recurriendo también al empleo habitual de bombas de fabricación española de la marca Ideal, que inicialmente instalaba motores eléctricos de Indar, así como de la marca alemana de sistemas de bombeo KSB. Por tanto, en estas fechas puede decirse que ya estaría disponible con normalidad en España la tecnología de bombeo precisa para poder explotar pozos de diámetro reducido perforados mediante maquinaria.

Aunque el desarrollo de la tecnología de bombas verticales estuvo siempre ligado al aprovechamiento de los recursos hídricos, no puede decirse lo mismo de la mejora de diseño que consiguió llevar a la madurez la tecnología de elevación de aguas subterráneas profundas, que no fue otra que la posibilidad de que la bomba y el motor de accionamiento se montaran unidos y sumergidos bajo el agua gracias a las conocidas como bombas electrosumergidas. Este sistema de elevación fue una clara transferencia tecnológica de la industria del petróleo, que las empleó durante años antes de ser utilizada en el mundo del agua. Su uso surge ante la necesidad de alcanzar mayores profundidades acuíferas, cuyo acceso estaba limitado a poco de 120 metros de profundidad en las bombas verticales, a causa de las grandes pérdidas de rendimiento mecánico de los ejes de transmisión de gran longitud y de la necesidad de emplear ejes de gran sección para grandes profundidades.

En muchas ocasiones, como suele suceder en otros sistemas de bombeo, las invenciones no pueden ser atribuidas a una persona determinada o a un momento de tiempo preciso,

⁴² Velasco (2006), p. 53. La marca Ventury era propiedad de Justo Martínez Amutio (perito industrial, político y escritor) y fabricaba bombas verticales capaces de elevar caudales entre 500-10.000 litros por minutos con alturas de hasta 90 m.

⁴³ Instituto Nacional de Colonización (1945), p. 5.

⁴⁴ Puche (2013), p. 61, menciona que la primera bomba vertical se instaló en Quintanar de la Orden en 1947. Como hemos visto en el mercado nacional ya se comercializaban este tipo de bombas a mediados de los años veinte.

⁴⁵ En los planos de Instituto Nacional de Colonización (1942) y (1945) pueden verse las soluciones de bomba centrífugas en cámara exenta. En los planos de Instituto Nacional de Colonización (1951) ya queda claro la selección en el proyecto de bombas verticales para los pozos excavados.

cosa que no ocurre en el caso de la bomba electrosumergida, que fuera inventada por el ruso Arutunoff en la segunda década del siglo XX. Arutunoff fundó la empresa Russian Electrical Dynamo of Arutunoff (REDA) en 1911 y desarrolló el primer motor eléctrico capaz de trabajar junto al cuerpo de la bomba sumergido en un pozo de petróleo. En la búsqueda de financiación para el desarrollo de sus ideas emigró a Alemania en 1919 y posteriormente a los EEUU en 1923, donde en el campo petrolífero de El Dorado (Kansas) pondría en explotación la primera captación de petróleo con una bomba electrosumergida en 1926⁴⁶. La primera solicitud de patente de bomba sumergible presentada por Arutunoff para agua, petróleo y fluidos peligrosos en los EEUU fue registrada en febrero de 1925, otorgándose dicha patente en diciembre de 1926⁴⁷.

Constructivamente las electrobombas sumergidas están compuestas por un motor eléctrico sobre el que se acopla directamente la parte hidráulica, a la que transmite el movimiento a través de un eje. La parte hidráulica la conforma una bomba centrífuga multietapa (mayor número cuanto mayor sea la altura de elevación), en cuya parte superior se conecta la tubería de impulsión. Se trata en todos los casos de un motor eléctrico que recibe la energía desde la superficie a través de un cable eléctrico protegido, siendo este uno de sus principales inconvenientes, ya que estos equipos de elevación requieren disponer de energía eléctrica para su accionamiento, bien a través de una línea eléctrica o de un grupo electrógeno generador de electricidad a partir de gasolina o gasoil⁴⁸, causa probable de que no se extendiera antes su empleo en el ámbito rural. Las principales ventajas de estas bombas radican en su capacidad de trabajar totalmente sumergido bajo el agua el conjunto motor-bomba y en la reducida sección de sondeo necesaria para su instalación, ya que el agujero solo es ocupado por la tubería de impulsión y el cableado eléctrico, permitiendo reducir considerablemente el diámetro del sondeo y, por tanto, su ejecución mediante maquinaria de perforación. La escasa incidencia de las fluctuaciones de los niveles del agua en los acuíferos al estar la bomba sumergida, la refrigeración del motor por la circulación del agua del sondeo y su casi nulo ruido de funcionamiento son algunas de sus otras ventajas.

A pesar de que los primeros prototipos de bombas electrosumergidas se concibieron en los años veinte del siglo XX, su uso estuvo limitado a la industria del petróleo y a trabajos de achique contra-inundaciones hasta finales de los años cuarenta, en que pasaron a comercializarse y a estar disponibles para su empleo en captaciones de agua subterráneas⁴⁹. La aparición de modelos de 4" (diámetro 100 mm) generalizó su uso en las granjas de los EEUU. La transferencia tecnológica que se produjo en el caso de las bombas electrosumergidas entre la industria del petróleo y la de la captación de las aguas subterráneas es un claro ejemplo de que los resultados de una innovación en un determinado sector pueden tener impactos relevantes en otros, definido por Rosenberg en su modelo conceptual como relaciones interindustriales.

⁴⁶ Tacaks (2009), p. 5.

⁴⁷ Arutunoff (1926).

⁴⁸ Actualmente también se emplea energía solar y eólica.

⁴⁹ Ackerman y Löf (1959), p. 283.

En España no existe constancia de su empleo hasta la segunda mitad de la década de los cincuenta, inicialmente comercializadas bajo la marca comercial EMU y especialmente cuando la marca española Indar con licencia de la alemana EMU Unterwaspumpen empezó a fabricarlas⁵⁰. También eran habituales otras marcas alemanas como Pleuger, KSB y Ritz, además de la española Brugg, que fabricaba con licencia de la suiza Pumpenbau Brugg, y de la alemana Hubner. Sorprende que no se comercializaran en España marcas de procedencia norteamericana de bombas electrosumergidas, a pesar de ser los mayores productores a nivel mundial, pudiéndose encontrar una explicación en la buena implantación y posición dominante en el mercado nacional de la americana Worthington, que no fabricaba este tipo de equipos sumergidos.

La introducción en el mercado de las electrobombas sumergidas permitió: (1) alcanzar la madurez tecnológica en los sistemas de elevación de aguas subterráneas, posibilitando explotar niveles acuíferos inaccesibles hasta la segunda mitad de la década de los cincuenta del siglo XX en España y (2) la ejecución de sondeos con el empleo de maquinaria de perforación de diámetros aún más reducidos que para el caso de las bombas verticales. Es la superposición de estos dos hitos, la electrobomba sumergida y la disponibilidad de maquinaria de perforación, que se analizará en profundidad a continuación, lo que sin lugar a duda marcaría el futuro de la explotación de las aguas subterráneas en la España de la segunda mitad del pasado siglo y, consecuentemente, del desarrollo agrícola de muchas zonas de la península. Conviene también dejar claro que las bombas de eje vertical continuaron siendo muy empleadas para sondeos en los que los niveles del agua se encontraban a menos de 50-60 m, hasta que la sobreexplotación de los acuíferos de gran parte de España provocó el descenso de los niveles piezométricos y fue necesario reperforar muchas captaciones hasta mayores profundidades, instalándose electrobombas sumergidas.

3. Hacia la madurez tecnológica en los sistemas de perforación

Desde hace varios miles de años las distintas civilizaciones han venido realizando obras de captación de aguas subterráneas, inicialmente mediante pozos y galerías excavados por medios manuales que hoy día se siguen ejecutando en muchas partes del mundo⁵¹, hasta las modernas perforaciones acometidas con medios mecánicos que llegan a alcanzar profundidades de miles de metros. Se cree que los primeros pozos y galerías de captación fueron construidos a mano por los habitantes de las regiones áridas de Asia, alcanzándose profundidades de hasta 50 m. Fueron los chinos, hace cuatro milenios, los pioneros en concebir una técnica de perforación mecánica mediante máquinas de bambú que puede

⁵⁰ Emu-Indar (1959). En Murcia (1953), p. 181-182, se encuentra por primera vez una referencia en la bibliografía española a las bombas electrosumergidas, afirmandose: "Empiezan a difundirse actualmente...". Señalar que en esta publicación las fotografías de este tipo de bombas son cedidas por Mr. Tscherbakoff al autor. En Comunidad de Albaracín (1959), p. 24, se menciona que la maquinaria de perforación del INC permitía ejecutar sondeos en los que se podían colocar bombas de hasta 300 mm de diámetro, bien de eje vertical, bien "del moderno sistema de motor eléctrico sumergido en agua y lubricado por ella".

⁵¹ Aunque en el presente artículo no se analizan en detalles las distintas técnicas empleadas para la ejecución de pozos y galerías excavados con medios manuales se recomienda la consulta de Matallana (1951), pp. 27-52, y Murcia (1953), pp. 101-126 y 154-172.

ser considerada la precursora del actual sistema de percusión. En Europa no sería hasta el siglo XII cuando comenzara a despertarse el interés por las aguas subterráneas, a raíz de la perforación de los primeros pozos artesianos, aunque las aguas más someras se alumbraban mucho antes mediante pozos y galerías excavados a mano y eran elevadas con sistemas manuales y norias. Hasta medianos de la segunda mitad del siglo XIX, cuando se acoplara la máquina de vapor a los sistemas de perforación a percusión y rotación, se continuó con la excavación manual de pozos y con sistemas mecánicos accionados por tracción animal, viviendo la captación de las aguas subterráneas un auténtico boom durante el siglo XX gracias a las innovaciones introducidas en las técnicas y procedimientos de perforación y a la generalización de los motores de combustión interna con los que accionar las máquinas⁵².

Además de la lógica diferenciación de las técnicas de perforación entre manuales y mecánicas, tradicionalmente se han clasificado los sistemas de perforación en función del mecanismo que se emplea para efectuar la excavación del terreno en: aquellos que logran la rotura por impacto con superación del límite elástico o con disgregación del material; y en los que lo hacen por rotura con corte por cizallamiento o con desgaste por abrasión. Dentro de la tipología de rotura por impacto se enmarcan los sistemas de percusión y de rotopercusión, y en los de rotura por corte los de rotación con corona, trialeta, tricono, hélice, etc⁵³.

La percusión es sin duda la técnica mecánica más antigua empleada para la construcción de pozos, existiendo referencias históricas de su uso en China durante la dinastía Chou para la extracción de sal y agua hace más de 4.000 años, alcanzándose profundidades de más de 200 m. El sistema se accionaba mediante tracción humana y la sarta de perforación estaba fabricada con cañas de bambú. Aunque existen referencias previas de perforación de pozos de petróleo en Rusia (1948), Polonia (1954) y Canadá (1958), se considera que el pozo ejecutado por percusión en 1859 en Pensilvania por el coronel Edwin Drake marcó el comienzo de la floreciente industria del petróleo americana, a la que tanto debe la de la captación de aguas subterráneas. El sistema se basa en el golpeo repetitivo del material a excavar con una herramienta pesada denominada trépano, en su movimiento de bajada y subida, y la evacuación de los detritus con el empleo de las cucharas. En función del mecanismo que transmite el movimiento al trépano se distinguen dos sistemas de perforación a percusión: el método canadiense, en el que el movimiento de subida y bajada del trépano se realiza mediante una columna de varillaje macizo; y el método pensilvaniense, en el que el citado movimiento de vaivén se consigue mediante un cable. Este último método debe su nombre a que fue el empleado en Pensilvania por Drake⁵⁴.

⁵² Martínez y Gisbert (2014), pp. 2-3. Véase también Puche (1996).

⁵³ Martínez y Gisbert (2014), pp. 6-7.

⁵⁴ López *et al.* (2000), p. 75. Esta clasificación de los métodos de perforación a percusión es la comúnmente aceptada en la actualidad, siendo habitual que en el pasado al sistema pensilvaniense se le denominara chino, en Vilanova (1880), p. 354, y en Mesa (1934), p. 166, y americano, en Mesa (1934), p. 171. Al método canadiense también se le conocía como anglo-germánico, en Vilanova (1880), p. 356, y europeo, en Mesa (1934), p. 152.

Los sondeos artesianos deben su nombre al hecho de haber sido ejecutados desde el siglo XII en el condado de Artois, noreste de Francia, donde con sondeos de tan solo 20 a 30 metros de profundidad de excavación se alcanzaban aguas que ascendían hasta la superficie de forma natural, siendo el más antiguo de la región el abierto en 1126 dentro del patio del convento de los Dominicos de la ciudad de Lillers⁵⁵, aunque existe constancia de su empleo desde la época de las antiguas civilizaciones de Siria y Egipto⁵⁶. Ya en el siglo XIX son de destacar los pozos artesianos ejecutados mediante percusión para el abastecimiento de la ciudad de París en la Granelle en 1841, terminado tras nueve años de ejecución con una profundidad de 549 metros, y en Passy en 1861, con 587 metros y seis años de ejecución⁵⁷. El primer pozo artesiano de España fue promovido por la Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante en 1859 junto a la estación de Albacete, alcanzando una profundidad de 86 metros⁵⁸. A partir de entonces comenzaron a ejecutarse perforaciones de este tipo por toda la península, prodigiándose especialmente en la zona levantina (Cartagena, vega de Murcia, Valencia y Barcelona, principalmente)⁵⁹.

Mención especial merece el pozo para la búsqueda aguas artesianas promovido en la segunda mitad del siglo XIX por el Ayuntamiento de Vitoria y adjudicado a José María Lopidana, con la condición de que el Corporación Municipal abonaría 2.000 duros por cada litro de agua que saliera a la superficie, no abonándose nada en caso de fracasar en la empresa de encontrar aguas artesianas. Las obras fueron dirigidas por el ingeniero Alphonse F. Richard y comenzaron a ejecutarse en la actual plaza de la Virgen Blanca en noviembre de 1877. Los primeros metros de la perforación se acometieron mediante el empleo de un sistema de percusión accionado por varios operarios (tracción humana) que hacían girar unos volantes adosados a un cilindro donde se enrollaba una cadena, provocando gracias a tres poleas colocadas en el castillete la subida del trépano y del varillaje de perforación, para posteriormente hacerlo bajar súbitamente en caída libre hacia el frente de excavación⁶⁰. Según se avanzaba se iban incorporando nuevos tramos de varillaje, retirando los detritus mediante el empleo de cucharas que obligaban a montar y desmontar continuamente el varillaje rígido de perforación. Alcanzados a brazo los 110 metros de profundidad y entendiéndolo el director de las obras que era necesario incrementar el ritmo de la perforación, a mediados de 1878 se continuó con la misma técnica de perforación por percusión pero accionado el movimiento de las herramientas con una máquina de vapor de 28 CV, pasando a perforarse entre 5 y 6 metros al día con un diámetro de 600 mm⁶¹. Finalmente el pozo se perforó hasta más de 1.000 metros de profundidad sin hallarse aguas artesianas, siendo el más profundo ejecutado hasta esa fecha y durante muchos años después⁶².

⁵⁵ Mesa (1934), p. 73.

⁵⁶ Véase Vilanova (1880), pp. 289-297.

⁵⁷ Mesa (1934), pp. 73-77.

⁵⁸ Mesa (1934), p. 103.

⁵⁹ Véase Mesa (1934), pp. 103-149.

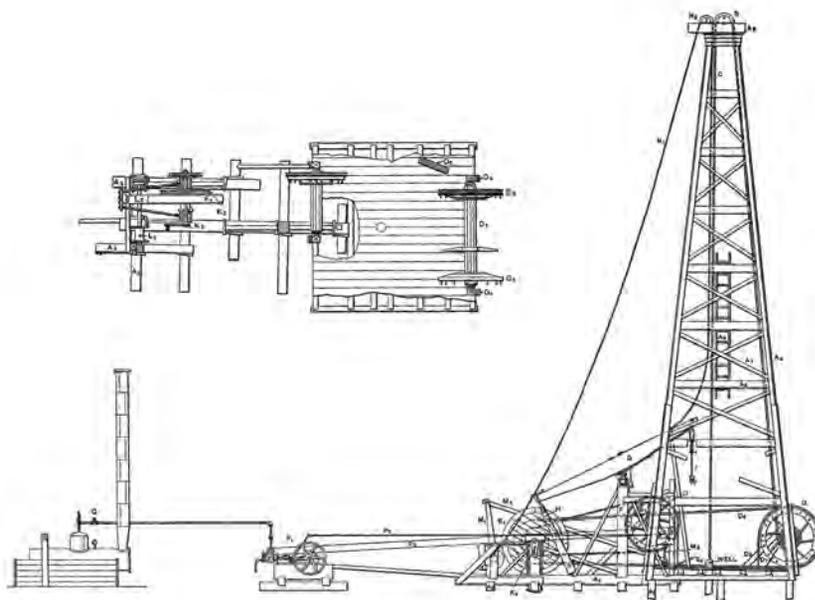
⁶⁰ La Ilustración Española y Americana (15-12-1877), p. 371.

⁶¹ La Ilustración Española y Americana (15-08-1878), p. 98.

⁶² Mesa (1934), p. 38.

Todos estos pozos artesianos a percusión acometidos en el continente europeo durante el siglo XIX empleaban el método canadiense o europeo, descrito para el caso del pozo de Vitoria, causando sensación durante la Exposición Internacional de París de 1900 la ejecución por parte de la empresa americana Oil Well Supply de un pozo en el Bois de Vincennes de 590 metros y diámetro 100 mm en tan solo dos meses. La maquinaria del tren de sondeo de Oil Well Supply era accionada por vapor y se empleaba en EEUU para buscar petróleo. La principal diferencia de este tren de sondeo con los utilizados en Europa consistía en la sustitución de barras rígidas para sostener los útiles de perforación por un cable⁶³, propio del método a percusión pensilvaniense o chino, lo que provocó que durante años se denominará método americano en la bibliografía europea.

Figura 3. Tren de sondeo a percusión por cable accionado mediante máquina de vapor de principios del siglo XX



Fuente: Bowman (1911).

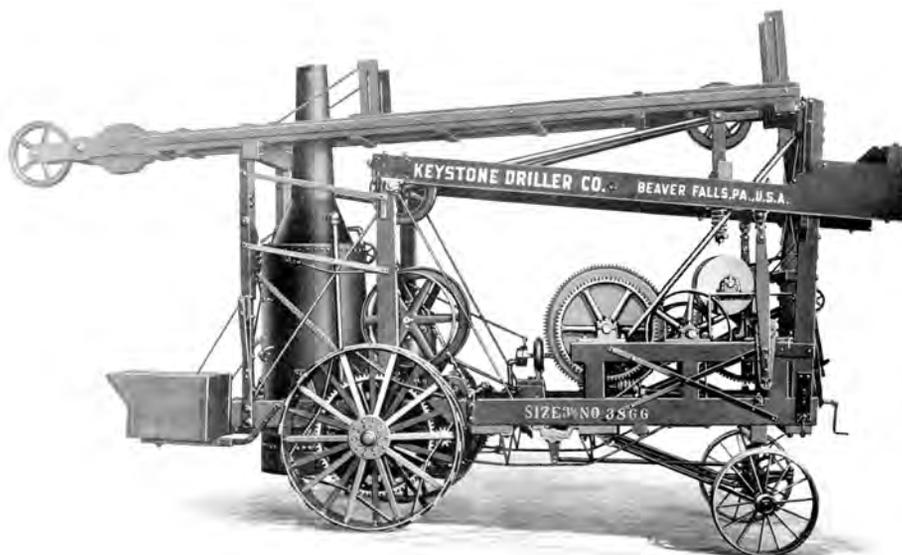
El principal inconveniente del sistema europeo consistía en la lentitud a la hora de cambiar el trépano de perforación y pasar a las cucharas con las que se recogían los detritus de la perforación, ya que era necesario desmontar y montar la totalidad del varillaje roscado, mientras que en los sistemas por cable esta operación es muy rápida. Esta rapidez es debida al empleo de tambores cilíndricos en los que los cables se enrollan gracias al movimiento giratorio de los motores. La subida y bajada del trépano en los sistemas por cable se consigue mediante el empleo del denominado balancín, que acorta

⁶³ Mesa (1934), p. 77.

también considerablemente los tiempos de ejecución. Desde entonces la técnica de percusión por cable se extendió por toda Europa gracias a su mayor rapidez y menor coste.

A comienzos del siglo XX la empresa Trefor S.A. (Madrid) fabricaba en España perforadoras a percusión y acometía ella misma sondeos, como sucediera en 1902 con los ejecutados en Cartagena, donde se alcanzó en uno de ellos una profundidad de 200 metros con un diámetro interior de 300 mm⁶⁴. Existe constancia de la presencia en la provincia de Murcia también en esa época de maquinaria de perforación a percusión de la casa americana Keystone Driller empleada en la ejecución de pozos artesianos⁶⁵. Dentro de la tipología de perforadoras a percusión con cable accionada a vapor, similares a la presentada en París en 1900, se fabricaba a finales de la segunda década del siglo pasado en los talleres de Agapito de Aranguren de Bermeo la sonda Ideal Ibérica, con una caldera de vapor de 35 CV, una profundidad máxima de perforación de 1.000 metros y un diámetro máximo de perforación de 300 mm⁶⁶.

Figura 4. Máquina de perforación a percusión por cable con accionamiento mediante máquina de vapor con el mástil recogido



Fuente: Keystone Driller Company (1911), p. 20.

⁶⁴ Sánchez (1995), p. 39.

⁶⁵ Sánchez (1995), p. 41.

⁶⁶ Mesa (1934), p. 293.

En la técnica de perforación a rotación el avance se consiguen gracias a la acción de una herramienta de corte que combina presión (peso) sobre el terreno a excavar con un movimiento rotativo, a la vez que los materiales excavados son extraídos del frente de avance y transportados hasta la superficie mediante un fluido o por medios mecánicos. El empleo de esta técnica se remonta a su uso por los egipcios para cortar las piedras con las que edificaban las pirámides y templos de Gizeh⁶⁷, aunque no sería hasta el siglo XIX cuando se comenzó a utilizar para la perforación de pozos. Los primeros desarrollos de las técnicas modernas de rotación son atribuidos al ingeniero suizo Leschot que con ayuda del mecánico Pihet concibió una perforadora rotativa sacatestigos de 42 mm de diámetro exterior con diamantes en su tallante, esta máquina era de tracción manual y así lo fueron hasta que en 1870 se fabricaron los primeros equipos accionados mediante una máquina de vapor⁶⁸. El giro de las sondas se realizaba inicialmente mediante ruedas troncocónicas dentadas de acero, hasta que en 1890 se perforara en Texas un pozo petrolífero mediante mesa de rotación y barra Kelly⁶⁹, convirtiéndose esta técnica en la más empleada en el siglo XX para la ejecución de sondeos de captación de agua hasta la introducción de los cabezales de rotación. El empleo de lodos para mantener las paredes de los sondeos y evitar su derrumbe comenzó a emplearse en la primera década del siglo pasado en las EEUU. Respecto a los tallantes situados en el frente de la excavación se distinguía entre: (1) las sondas que a la vez que perforaban extraían una muestra inalterada del terreno (sondas sacatestigos), muy habituales en minería, que empleaban coronas huecas con diamantes insertos; y (2) las que trabajaban a destroza, más empleadas en pozos de petróleo y agua, excavando casi en exclusiva con trialetas, hasta que 1909 el americano Howard R. Hughes presentara la solicitud de patente del bicono⁷⁰. Este tallante formado por dos piñas con dientes de acero de alta resistencia mejoró considerablemente la capacidad de perforación de los sistemas de rotación en los materiales más duros, evolucionando en los años treinta hacia el tricono, cuya primera patente fue concedida a Scott y Garfield de Hughes Tool Company en 1934⁷¹.

De nuevo en Murcia destaca la creación en 1912 de la empresa de Francisco Sánchez Madrid, que comenzó su andadura con la ejecución de un sondeo de 100 m de profundidad entubado en tubería de 15 mm de diámetro en Águilas mediante el empleo de una perforadora rotativa alquilada a la Empresa Minera de Jaravía (Pulpí). Tal fue el éxito logrado que este empresario fabricaría solo un año después una máquina perforadora a rotación accionada por una máquina de vapor. La empresa llegaría posteriormente a tener en activo un total de 17 trenes de sondeo por rotación de fabricación propia empleados en la construcción de pozos artesianos y prácticas mineras, alcanzando profundidades de 800 m y siendo la única empresa española dedicada a la fabricación de este tipo de máquinas. Francisco Sánchez Madrid está considerado también uno de los pioneros de los estudios eléctricos de prospección de aguas subterráneas en España, tras

⁶⁷ Lehr *et al.* (1988).

⁶⁸ López *et al.* (2000), p. 151.

⁶⁹ López *et al.* (2000), p. 261.

⁷⁰ Hughes (1909).

⁷¹ Scott y Garfield (1934).

realizar en Águilas en 1912 uno de estos estudios con un equipo importado de California⁷². Los reducidos diámetros de perforación ejecutados por toda esta maquinaria dejan claro que su labor se centraría en la búsqueda de aguas artesianas, ya que no podrían albergar en su interior los equipos de bombeo disponibles en España en aquella época.

Uno de los grandes problemas con los que se encontraban los sistemas mecánicos de perforación accionados mediante máquinas de vapor y motores de combustión interna hasta los años treinta era la lentitud de su implantación y de su avance, tardándose una semana en montar los equipos y perforar solo 15 metros de profundidad. Todo cambió cuando George E. Failing de la Failing Company montó en 1930 una vieja perforadora a rotación sobre un camión Ford de 1927, incorporando un sistema de transferencia de energía entre el motor del camión y la perforadora. En 1935 Failing Company ya fabricaba cinco modelos diferentes de perforadoras acopladas a un camión con capacidad de alcanzar profundidades entre 75 y 1.500 metros⁷³. Con esta invención se abriría la era de las perforadoras autoportantes accionadas mediante motores de combustión interna. Inicialmente estos motores eran compartidos por el camión y la perforadora, pasando a instalarse posteriormente dos o tres motores independientes, lo que permitía además que las perforadoras se montarían sobre semirremolques y remolques. Estos avances incrementaron considerablemente la rapidez de traslado e implantación de los equipos a rotación, así como las velocidades de avance de la perforación, quedando pronto tecnológicamente obsoletos los equipos accionados a vapor. Estas innovaciones surgidas en los sistemas a rotación se trasladarían también inmediatamente a los equipos a percusión.

El empleo del tricono y la aparición de los equipos autoportantes permitieron alcanzar la madurez de la tecnología de perforación a rotación, gracias al efecto acumulativo de mejoras menores descrito por Rosenberg. La aplicación de esta técnica para la explotación de yacimientos de gas y petróleo ha posibilitado muchos avances en la misma durante el siglo XX, algunos de los cuales han podido ser aplicados a la perforación de pozos de agua, estando claras una vez más las relaciones interindustriales entre ambos sectores. Continuando con el modelo conceptual de Rosenberg, la relación entre los equipos de bombeo de menos de 500 mm de diámetro (bombas verticales y electrosumergidas), que permitieron la elevación de las aguas subterráneas desde grandes profundidades, con los sistemas de perforación profundos capaces de horadar el terreno de manera rápida y efectiva con diámetros de hasta 600 mm constituye un ejemplo de complementariedad.

Para tratar de entender la situación de retraso en la que se encontraba España todavía a comienzos de los cincuenta en cuanto a la disponibilidad de maquinaria para la ejecución de sondeos resultan muy interesantes las palabras de 1951 del ingeniero agrónomo del INC Santiago Matallana Ventura: “No es raro encontrar por el mundo empresas industriales que cuenten con medios excepcionales para abrir pozos, de diámetros variables entre 10 y 60 centímetros, usando de complicada maquinaria y métodos diversos...Quede esto consignado aquí más como curiosidad que por otra cosa. En

⁷² Sánchez (1995), pp. 43-46.

⁷³ Dickson (s.f.).

España esto no es conocido, y en todas partes es difícil, caro y exige la existencia de elementos de que actualmente carecemos⁷⁴. Tan solo dos años después, el ingeniero que posteriormente dirigiría el Servicio de Aguas Subterráneas del INC, Andrés Murcia Viudas, afirmaba: “Van siendo cada día más utilizados los taladros, o pozos de pequeño diámetro, frente a los sistemas de excavación a cielo abierto... Dificultad de importancia resulta el hecho de existir actualmente en España contados trenes de perforación de tipos eficientes, lo que encarece el trabajo, principalmente en cuanto se refiere a su transporte y montaje⁷⁵. A partir de entonces y como resultado de la normalización de las relaciones comerciales entre España y los EEUU, como veremos más adelante, comenzarían a llegar modernos equipos de perforación a percusión y a rotación de procedencia norteamericana.

A mediados de la década de los setenta comenzó a emplearse la técnica de rotopercusión en España, que permitió incrementar considerablemente la velocidad de avance en terrenos duros y reducir considerablemente el tiempo y la inversión necesaria para la ejecución de un sondeo. Esta técnica universalizaría la construcción de sondeos haciéndola accesible a la mayoría de los usuarios de forma individual.

4. El papel del Estado en el aprovechamiento de las aguas subterráneas

El 15 de julio de 1905 se aprobaba un Real Decreto en el que se encargaba a la Comisión del Mapa Geológico de España, actual Instituto Geológico y Minero de España, determinar los lugares del país más propicios para la existencia de aguas subterráneas que pudieran alumbrarse mediante sondeos, pozos o galerías. Este Real Decreto mencionaba como en el Plan de Canales y Pantanos de 1902 se había olvidado el alumbramiento de las aguas subterráneas, haciéndose también referencia a que en los últimos años habían evolucionado las técnicas de perforación de sondeos para la captación de aguas artesianas y los descubrimientos de nuevos explosivos para la ejecución de pozos y galerías⁷⁶. En 1907 ya se había publicado la memoria correspondiente a los estudios de la cuenca del Tajo en la provincia de Madrid y la Comisión del Mapa Geológico había efectuado visitas a Andalucía, Cataluña, León y Castilla, atendiendo a la solicitud de Ayuntamientos y particulares, estableciendo el Real Decreto de 6 de abril de ese año que los interesados en la investigación de aguas subterráneas podrían solicitar a la Dirección General de Agricultura, Industria y Comercio el envío de una sonda de perforación, que bajo la dirección de la Comisión trataría de realizar “con el mayor de los aciertos los deseos del Gobierno en favor de la agricultura y de la industria nacionales⁷⁷. Posteriormente, por Real Decreto de 28 de junio de 1910, se ampliaba el auxilio del Estado para la captación de aguas subterráneas al considerar, además del informativo, el auxilio pecuniario, al

⁷⁴ Matallana (1951), pp. 55-56. Señalar que en la 3ª edición de esa misma publicación, Matallana (1964), pp. 59-60, desaparecen las frases “Quede esto consignado aquí más como curiosidad que por otra cosa. En España esto no es conocido, y en todas partes es difícil, caro y exige la existencia de elementos de que actualmente carecemos”, pues por entonces ya se disponía de moderna maquinaria.

⁷⁵ Murcia (1953), pp. 92-92.

⁷⁶ *Gaceta de Madrid* (24-07-1905), p. 306.

⁷⁷ *Gaceta de Madrid* (06-04-1907), pp. 79-80.

poder contribuir a la ejecución de las obras con una subvención que no excedería del 50% del total⁷⁸. Se trata de las primeras referencias del apoyo del Estado para la ejecución de sondeos profundos, pudiéndose interpretar que la sonda se centraría en la búsqueda de agua artesianas.

En el año 1916, de las 1,37 millones de hectáreas totales estimadas de superficie regada en España un 7% lo hacían con aguas subterráneas captadas mediante pozos y elevadas por máquinas, mientras tan solo un 2% procedían de pozos artesianos, porcentaje este muy poco representativo a escala nacional si tenemos en cuenta que el 92% de ellas se alumbraban solo en la región de Aragón⁷⁹.

El Estado continuaría con su labor en aras de alumbramiento de aguas subterráneas centrándose en la ejecución de sondeos de investigación para que sus resultados pudieran servir posteriormente de “orientación a los particulares y empresas para proyectar nuevos alumbramientos”⁸⁰. Estos trabajos iban principalmente encaminados a la búsqueda de aguas artesianas que pudieran ser empleadas sin necesidad de tener que ser elevadas hasta la superficie mediante el empleo de sistemas de impulsión. Destacan los trabajos promovidos por el Ministerio de Fomento en 1926 en la provincia de Almería (Níjar, Tabernas, Gádor, Turre y Pulpí) y en la de Madrid (Alcalá de Henares). Los sondeos ejecutados mediante técnicas de percusión y rotación se proyectaron para profundidades comprendidas entre 500 y 1.000 m en el caso de Níjar, Tabernas, Gádor y Alcalá de Henares y entre 250 y 500 m en Turre y Pulpí, con diámetros nunca inferiores a 60 mm y debiendo quedar entubados los sondeos en acero⁸¹. Estos reducidos diámetros dejan claro que se buscaban aguas capaces de alcanzar la superficie tan solo gracias a la presión hidráulica de las capas acuíferas atravesadas. El único de estos pozos que dio resultados positivos fue el de Alcalá de Henares, dando un caudal menor de 1 l/s⁸², resultando una inversión ruinosa para el Estado. Es importante dejar claro que muchos de los supuestos fracasos de los trabajos de búsqueda de aguas artesianas no lo fueron del todo, pues, aunque en muchas ocasiones las aguas no brotaran hasta la superficie por sí mismas, los nuevos sondeos permitían conocer a que profundidades se encontraban los niveles acuíferos y fueron muchas las veces en las que estos pudieron ser captados con la perforación de pozos excavados y elevadas las aguas.

Posteriormente, en 1929 se publicó otro concurso para la ejecución de cuatro sondeos en la provincia de Valencia (dos en la ciudad de Valencia y dos en sus alrededores), uno

⁷⁸ *Gaceta de Madrid* (29-06-1910), pp. 655-656. “Y de igual manera que la Administración estudia, subvenciona o ejecuta un pantano, un canal u otra obra..., debe estudiar, subvencionar o ejecutar un pozo artesiano, un socavón o un drenaje, ...”.

⁷⁹ Elaboración propia a partir de Ministerio de Fomento (1918), p. 399.

⁸⁰ *Gaceta de Madrid* (23-07-1926), p. 573.

⁸¹ *Gaceta de Madrid* (30-10-1926), pp. 498-499. Las empresas presentadas fueron Trefor, Foraky y Deutag, reuniendo solo las condiciones legales Trefor. El Instituto Geológico Minero de España consideró los precios inadmisibles por elevados declarando desierto el concurso, en *Gaceta de Madrid* (21-01-1927), p. 448. En enero de 1927 se vuelve a publicar nuevo anuncio de concurso público en las mismas condiciones, en *Gaceta de Madrid* (27-01-1927), pp. 366-369. De las cuatro ofertas presentadas solo fueron admitidas la de Trefor S.A. y la del Ingeniero de Minas Ricardo Icardo Fontán, resultando adjudicatario este último de los trabajos, en *Gaceta de Madrid* (07-04-1927), p. 201.

⁸² Mesa (1934), p. 406

en el Campo de Cartagena (Murcia) y otros dos en la cuenca del río Andarax (Almería). Los sondeos fueron proyectados para profundidades comprendidas entre 500 y 1.000 m de profundidad en el caso de los dos situados en los alrededores de Valencia, entre 500 y 800 m en el Campo de Cartagena y entre 400 y 700 m en la cuenca del río Andarax, con diámetros nunca inferiores a 80 mm y debiendo quedar entubados los sondeos en acero. Los dos ejecutados en la ciudad de Valencia se concibieron entre 350 y 700 m con un diámetro mínimo de 150 mm⁸³.

A partir de 1939 la política agraria se fundaría sobre los pilares, entre otros, de la autarquía y el intervencionismo⁸⁴. Esta política comercial exterior provocaría la pérdida de los mercados agrícolas internacionales y la reducción de las importaciones de los medios de labor agrícola, lo que provocó un retroceso en la tecnificación de la maquinaria agrícola, escasez de medios y piezas de recambio para los equipos en servicio, el establecimiento de cupos de carburantes⁸⁵ y dificultades de suministro de energía eléctrica. A esta política interna habría que sumar las consecuencias del bloqueo comercial de las naciones aliadas durante la década de los cuarenta, con gran incidencia en lo que concierne al aprovechamiento de las aguas subterráneas, ya que desde finales del siglo XIX los EEUU había sido el principal país desde el que se importaban equipos de perforación y sistemas de elevación. Esta relación comercial con los EEUU en maquinaria relacionada con las aguas subterráneas fue siempre mayor que con el resto de potencias europeas, quizás motivada por la mayor similitud hidrológica de grandes zonas de los EEUU con España y la singularidad española respecto a Europa.

La puesta en riego de grandes zonas de la península mediante el empleo de recursos subterráneos fue impulsada por primera vez directamente por el Estado en el año 1941 a través del Instituto Nacional de Colonización (INC), organismo dependiente del Ministerio de Agricultura, con la declaración de interés nacional de los trabajos de colonización del Campo de Dalías⁸⁶, provincia de Almería, y de los Saladares de Albaterra-Crevillente-Elche⁸⁷ en la provincia de Alicante. En ambos casos el proceso colonizador comenzó con el alumbramiento de las aguas subterráneas y una vez conocidos los caudales disponibles se procedió a la determinación de la superficie susceptible de ser regada y posterior redacción de los Planes Generales de Colonización. Por tanto, podría decirse que el acto fundacional del proceso colonizador en estas zonas fue la construcción y el aforo⁸⁸ de pozos de captación de aguas subterráneas, al igual que posteriormente

⁸³ *Gaceta de Madrid* (13-03-1929), pp. 211-213. Se presentaron al concurso público Ricardo Icardo Fontán, Félix Cifuentes González y la Sociedad Anónima Española de Sondeos Foraky, resultando adjudicatario Félix Cifuentes González. *Gaceta de Madrid* (18-06-1929), p. 1.622.

⁸⁴ Barciela y López (2003), p. 1.

⁸⁵ Barciela y López (2003), pp. 23-25.

⁸⁶ España (1941a).

⁸⁷ España (1941b).

⁸⁸ Se conoce como aforo de una captación al conjunto de operaciones consistentes en la ejecución de un ensayo de bombeo con extracción de distintos caudales y medición simultánea del nivel del agua en el interior del pozo o del sondeo aforado. Fruto del análisis de los resultados obtenidos se determina el caudal óptimo de explotación la captación.

sucedería en otras zonas del arco mediterráneo y Castilla La Mancha. Posteriormente, en 1954 se declararían de alto interés nacional y de urgencia los trabajos de investigación y alumbramiento de aguas subterráneas que realizaba el Instituto Nacional de Colonización, señalándose el especial interés del alumbramiento de aguas subterráneas con vistas a la transformación en regadío de determinadas zonas⁸⁹.

A partir de 1950 se produce una inflexión en la política del Ministerio de Agricultura, abandonándose la vocación colonizadora y encaminándose hacia la transformación técnica del agro nacional⁹⁰. El impulso de este nuevo rumbo en la política agrícola española se vio fuertemente condicionado y facilitado por el nuevo escenario internacional, más tolerante y colaborador con la dictadura del general Franco y con las economías occidentales en pleno proceso de expansión⁹¹. El 26 de septiembre de 1953 se firmaba el Pacto de Madrid por el que España autorizaba la implantación de bases militares americanas en territorio español y se comprometía a la introducción de medidas económicas liberalizadoras en la maltrecha economía española. A cambio los EEUU garantizaban al estado español ayuda militar, cooperación económica y asistencia técnica. La cooperación económica se materializaría a través de la ayuda económica que anualmente era asignada, la Public Law 480 y la Public Law 778, conocida como Enmienda McCarran. La enmienda McCarran, aprobada en septiembre de 1954, propició la consignación a España de excedentes agrícolas de EEUU por valor de 55 millones de dólares. El pago de estos 55 millones de dólares generó su correspondiente fondo de contrapartida en pesetas, cuyo 80% (44 millones de dólares / 1.713 millones de pesetas, al cambio de la época) quedó en manos del gobierno español. De estos 1.713 millones de pesetas fueron destinados a inversiones públicas en agricultura 1.414 millones de pesetas, gestionados por el Ministerio de Obras Públicas y el INC. Quizás en gran parte por ello tan solo en la década de los cincuenta se pusiera en riego una extensión igual a una tercera parte del total de las tierras irrigadas hasta 1950 en España⁹².

Además de la ayuda económica, fue también trascendental para el desarrollo de las zonas agrícolas dependientes de aguas subterráneas la apertura de las relaciones comerciales que permitieron importar de los EEUU los modernos equipos de perforación y los sistemas de bombeo verticales, que comenzarían a estar disponibles con normalidad en la primera mitad de los cincuenta. Igualmente, la asistencia técnica permitió el asesoramiento de personal americano al Ministerio de Agricultura, la formación de personal español en el United States Geological Survey (USGS)⁹³ y la integración en los primeros años de personal americano en los equipos humanos al cargo del manejo de los nuevos sistemas de perforación⁹⁴.

⁸⁹ España (1954), p. 891.

⁹⁰ Barciela *et al.* (1996), p. 81.

⁹¹ Barciela y López (2003), pp. 28-29.

⁹² Barciela y López (2003), p. 39.

⁹³ Según Murcia y Gomara (1959), p. 6, la primera vez que un equipo “con personal español en su totalidad” mediante el empleo de una Failing 2.500 hizo “sus primeras armas” fue en la zona de Requena (Valencia) en 1957.

⁹⁴ Según Murcia y Gomara (1959), p. 6, la primera vez que un equipo “con personal español en su totalidad” mediante el empleo de una Failing 2.500 hizo “sus primeras armas” fue en la zona de Requena (Valencia) en 1957.

En 1955 se creó el Servicio de Aguas Subterráneas (SAS) del Instituto Nacional de Colonización (INC)⁹⁵, unificándose los trabajos dispersos en la materia que acometían las distintas Delegaciones Provinciales y permitiendo la coordinación a nivel nacional de los distintos equipos de perforación y aforo dependientes de la Sección de Sondeos del Parque de Maquinaria Agrícola del INC, todos ellos recién llegados por entonces de los EEUU. Su creación se basó en la necesidad de que “de una forma sistemática y racional, investigase nuestras posibilidades y alumbrase, para el riego, los ocultos caudales de nuestro subsuelo”⁹⁶. Las labores dentro del INC consistían en: la elección de nuevas zonas susceptibles de ser investigadas; la programación de las investigaciones; la tramitación de los créditos precisos; la prospección hidrogeológica; la programación de las obras de captación; y la dirección y control de dichas obras.

Además de los trabajos realizados dentro del INC para el desarrollo de nuevas zonas regables, el SAS a través de su ayuda técnica y económica alentó de forma significativa la iniciativa privada. Los trabajos del SAS consistían en esta línea en: la recepción de peticiones de auxilios para nuevas captaciones; la visita a la finca de los peticionarios, informando sobre la viabilidad de los trabajos; tramitación de los expedientes y obtención de los auxilios; y la supervisión y control de los trabajos de captación⁹⁷. Sin lugar a dudas, pocas diferencias existían entre parte de los objetivos principales del SAS y los buscados por el Instituto Geológico y Minero en 1926 con la ejecución de los seis sondeos para la búsqueda de aguas subterráneas, en los que además de investigar nuevos aprovechamientos se buscaba servir de orientación a los particulares y empresas para proyectar nuevos alumbramientos.

Estas actuaciones de fomento de la iniciativa privada se enmarcaban dentro de la política de colonización de interés local del INC y consistían en la transformación por parte de los agricultores de explotaciones de secano a regadío con el auxilio del estado, que permitieron incrementar la superficie regada en la década de los cincuenta en casi 200.000 ha⁹⁸, en muchas ocasiones con el empleo de aguas subterráneas.

Desde sus orígenes el SAS buscó la colaboración del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), encomendando también estudios de prospección a empresas privadas especializadas⁹⁹, trabajando además de forma coordinada bajo la dirección del Instituto de Hidrología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) con la Dirección General de Obras Hidráulicas y los citados CSIC e IGME¹⁰⁰.

⁹⁵ Bajo la dirección del Ingeniero Agrónomo Andrés Murcia Viudas, que anteriormente fue Ingeniero Jefe de la Delegación del INC en Alicante y que permanecería como jefe del SAS hasta finales de los años setenta.

⁹⁶ Murcia y Gomara (1959), p. 2.

⁹⁷ Murcia y Gomara (1959), p. 3.

⁹⁸ Barciela y López (2003), p. 38.

⁹⁹ Murcia y Gomara (1959), p. 3. Algunas de las empresas privadas colaboradoras durante la década de los cincuenta en las prospecciones fueron la Compañía de Prospección Geofísica S.A., Geoproso, Prospecciones Industriales S.A., Laboratorio de Investigaciones Técnicas, Reyra y Subsuelo Español S.A..

Murcia (1966), pp. 15-16 y 18.

¹⁰⁰ Murcia (1966), pp. 15-16 y 18.

Se favoreció la industria de perforaciones para la búsqueda de aguas subterráneas en España, ya que el SAS contó desde el principio con la colaboración de diversas empresas particulares¹⁰¹. En junio de 1953 el Ministerio de Agricultura convocaba un concurso público para la contratación de equipos de perforación, pretendiendo la promoción y el fomento de este tipo de empresas y señalando la falta de acceso a “técnicas modernas” de perforación que sufría el campo español. Se pretendía contar con un contrato en exclusiva con una duración de cinco años para la ejecución de captaciones cuando no pudieran ser ejecutadas con medios propios del Ministerio, quedando obligado a la contratación de las empresas adjudicatarias tanto para las obras ministeriales como para las de los particulares beneficiados por auxilios o subvenciones. Señalar que una de las cláusulas del concurso recogía que sería el Ministerio de Agricultura el que gestionaría la concesión de las licencias de importación de los equipos que las empresas tuvieran adquirir en el extranjero¹⁰², lo que deja clara la ausencia de este tipo de equipos en España. En noviembre de 1953 se resolvía el concurso resultando adjudicatarias las empresas Hidrotécnica Española S. en C., Cimentaciones Especiales S.A., Pilotajes y Sondeos S.A., Obras Subterráneas S.A. y Tierras y Hormigones S.A., destacándose en la Orden Ministerial que la importación de los equipos de modernos equipos de perforación constituía uno de los puntos fundamentales del concurso¹⁰³.

En 1959, el parque de maquinaria de perforación del INC para ejecutar captaciones de agua subterránea estaba integrado por: cinco perforadoras a rotación Failing 2.500 capaces de alcanzar hasta 800 m; tres perforadoras a rotación Failing 1.500 capaces de alcanzar hasta 500 m; cuatro perforadoras a percusión Speed Star 72 capaces de alcanzar hasta 500 m; y diez perforadoras a percusión Speed Star 71, Ruston-Bucyrus y Bucyrus-Erie capaces de alcanzar hasta 250 m¹⁰⁴. Todos estos equipos tenían capacidad de perforar en diámetros mayores de 400 mm en los primeros 100 m de profundidad. También controlaba el INC una docena de perforadoras de sus empresas colaboradoras, por lo que el número de equipos disponibles ascendía a 34 unidades, todas ellas de procedencia norteamericana.

La existencia de este moderno parque de maquinaria a partir de los años cincuenta permitió al INC la ejecución de gran cantidad de nuevos sondeos perforados, superando rápidamente las longitudes de pozos excavados y galerías, como puede observarse en la Gráfica 1.

Fruto de estos trabajos de perforación con maquinaria moderna, en 1959 los caudales alumbrados en sondeos perforados por el INC superaban a los procedentes de pozos excavados y galerías (Gráfica 2). Considerando un hipotético funcionamiento en continuo de los pozos y de los sondeos ejecutados hasta el verano de 1959 por la maquinaria de perforación del INC, los volúmenes anuales de aguas subterráneas podrían haber

¹⁰¹ Murcia y Gomara (1959), p. 3. Algunas de las empresas colaboradoras para la ejecución de sondeos en la década de los cincuenta fueron Vegarada S.A., Sondeos S.A. y Rielsa.

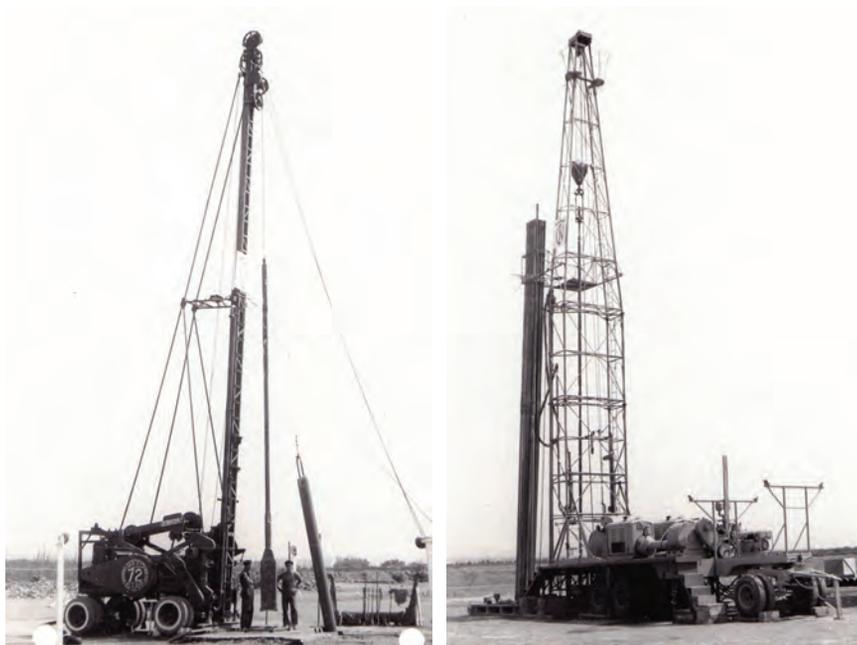
¹⁰² *Gaceta de Madrid* (20-06-1953), p. 3.737.

¹⁰³ *Gaceta de Madrid* (27-11-1953), p. 7.006.

¹⁰⁴ Ministerio de Agricultura (1959), pp. 7-8, y Comunidad de Albarracín (1959), p. 24.

alcanzado los 572 hm³. muy por encima, por ejemplo, de los 350 hm³ de volumen medio anual trasvasado en sus treinta años de explotación del trasvase Tajo-Segura al Levante peninsular, obra esencial del Plan de Obras Hidráulicas de 1933 que entraría en servicio finalmente en 1981¹⁰⁵.

Fotos 1 y 2. A la izquierda, máquina de perforación a percusión por cable marca Speed Star modelo 72 durante los trabajos de perforación en el Campo de Níjar en la segunda mitad de la década de los cincuenta. A la derecha, máquina de perforación a rotación tipo rotary marca Failing modelo 2.500 en el mismo lugar y fecha



Fuente: Mediateca del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

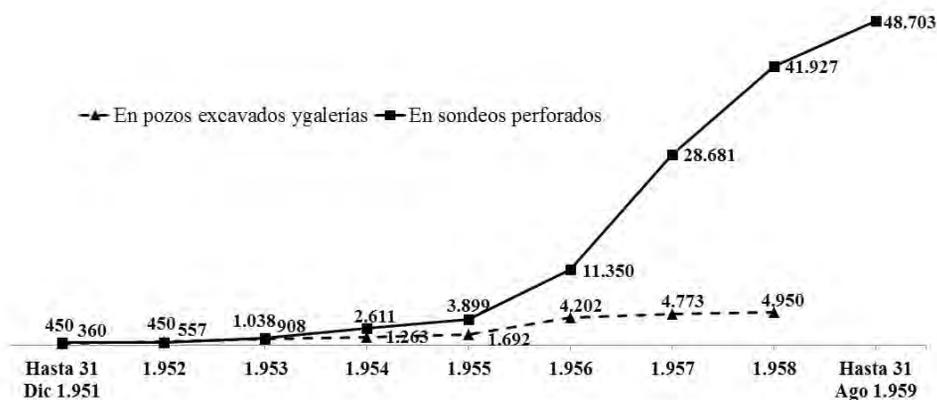
Durante los años siguientes continuó la exploración y captación de aguas subterráneas de forma sistemática por parte del INC, alcanzando los caudales alumbrados a finales de 1965 mediante pozos los 11.212 l/s (287 pozos, de los que tan solo se ejecutaron 32 entre 1959 y 1965) y con sondeos perforados ejecutados por su parque de maquinaria a 30.966 l/s¹⁰⁶. La suma de estos caudales instantáneos posibilitaría en el mejor de los casos (funcionamiento ininterrumpido) contar con volúmenes anuales de 1.331 hm³. Para entender la trascendencia de la disposición de estos recursos en el desarrollo del regadío

¹⁰⁵ Confederación del Tajo (2014).

¹⁰⁶ Ministerio de Agricultura (1966), p. 124.

nacional promovido por el Estado en esos años, basta compararlos con los 619 hm³/año¹⁰⁷ de volumen medio anual previstos en el trasvase del Ebro, incluido en el Plan Hidrológico Nacional aprobado en 2001, que nunca llegaría a ejecutarse y sería sustituido por el Plan Agua. Respecto a la distribución geográfica, los caudales de aguas alumbrados a finales de 1965 en las provincias de Ciudad Real (5.479 l/s), Almería (5.118 l/s), Valencia (4.342 l/s), Albacete (4.277 l/s), Murcia (2.757 l/s) y Alicante (1.509 l/s) representaban el 76% del total peninsular de aguas subterráneas obtenidas por el INC¹⁰⁸. Las aguas alumbradas por el INC hasta 1965 (1.331 hm³) suponían una fracción muy importante del volumen total de aguas subterráneas aprovechadas en España, estimadas a finales de 1966 en 3.000 hm³. En ese mismo año, ya se disponía de equipos para una transformación anual en regadío con aguas subterráneas de unas 16.000 ha anuales, repartidas a partes igual entre el Estado y las empresas privadas del sector¹⁰⁹.

Gráfico 1. Longitud acumulada en metros de pozos, galerías y sondeos ejecutados por el INC hasta el 31 de agosto de 1959



Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Agricultura (1959), Comunidad de Albarracín (1959), Murcia y Gomara (1959) y Murcia (1960).

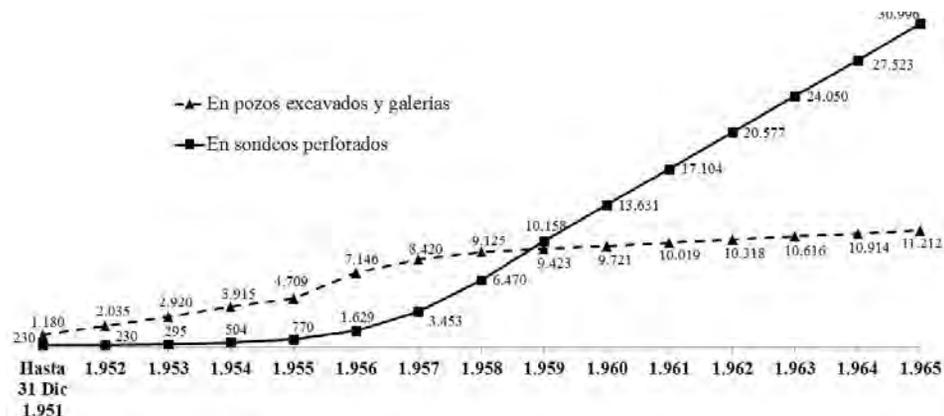
Al finalizar el año 1972, integrado ya el INC en el Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA), el caudal de aguas subterráneas por él alumbradas alcanzaba los 66.356 l/s (Gráfica 3), que con la hipótesis de funcionamiento considerada anteriormente habría permitido disponer de 2.093 hm³ de aguas subterráneas al año, cifra muy significativa si tenemos en cuenta que en 1994 se estimaba que el aprovechamiento de las aguas subterráneas alcanzaba los 5.500 hm³, pudiendo llegar a 6.500 hm³/año en periodos de sequía¹¹⁰. Las captaciones de las provincias de Ciudad Real (12.055 l/s), Almería (10.989 l/s), Albacete (7.940 l/s), Valencia (7.427 l/s), Alicante (4.148 l/s) y Murcia (3.967 l/s) representaban el 73% del total peninsular¹¹¹. En la Gráfica 3 puede observarse como

¹⁰⁹ Murcia (1966), pp. 14 y 18.

¹¹⁰ López-Geta y Fornés (2013), p. 20.

entre 1955 y 1972 se produce un trabajo continuado y constante en la captación de nuevos recursos subterráneos.

Gráfico 2. Caudales alumbrados acumulados en litros/segundo en pozos, galerías y sondeos ejecutados por el INC hasta 1965



Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Agricultura (1959), Comunidad de Albarracín (1959), Murcia y Gomara (1959), Murcia (1960) y Ministerio de Agricultura (1965).

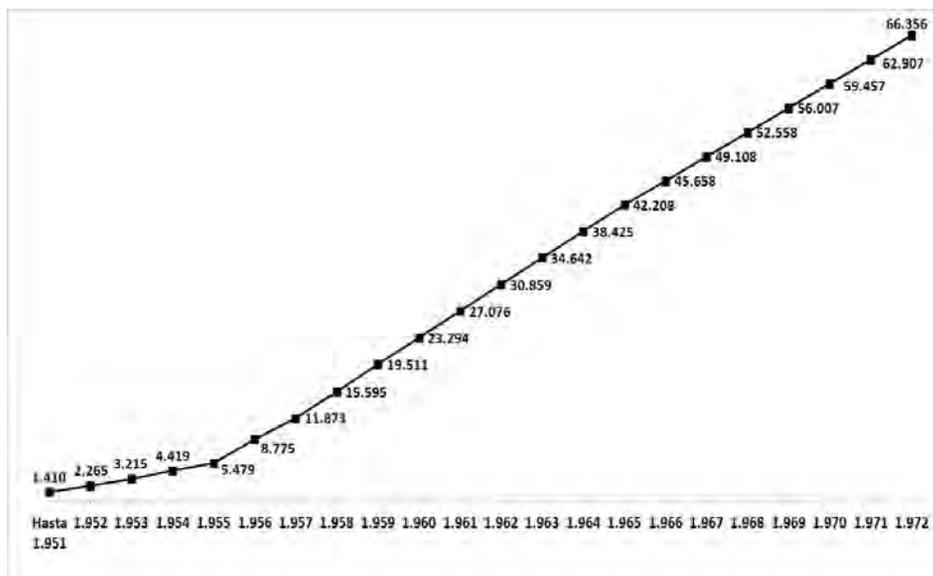
Nota: En el periodo comprendido entre el 1 de agosto de 1958 y el año 1965 se ha considerado un crecimiento anual homogéneo.

El parque de maquinaria del IRYDA para la ejecución de sondeos de captación estaba integrado a finales de 1971 por: diez máquinas a rotación (dos Itag DSI, dos Failing 1.500, una Failing S1, cinco Failing 2.500, una Failing por circulación inversa); veintiséis máquinas a percusión (dos Ruston Bucyrus 22EE, seis Bucyrus 22WW, una Speed Star 71, dos Speed Star 72, diez Walker Neer S32 y cinco Walker Neer S33); y cuatro sondas mixtas rotación-percusión (una Speed Star 71, dos Speed Star 72 y una Wirth SE). Todas de fabricación norteamericana, salvo las de las marcas Itag y Wirth. En esta fecha también disponían de equipos de perforación el IGME (una Speed Star 81 a percusión, una Craëlius E2 y una Failing CFD1 a rotación) y el Servicio Geológico de Obras Públicas (cinco Failing 1.250, 4 Speed Star 71 y 72 y una Wirth D2). A estos equipos del Estado había que sumar también los de las empresas Agua y Suelo, Cimentaciones Especiales Rodio, Craëlius, Ibérica de Sondeos, Kronsa, Persond, Sondeos Racionales, Vegarada, Campos Becerra e Idelfonso Campos. A finales de 1971 el número de equipos de perforación disponibles en España se evaluaba en una centena¹¹².

¹¹¹ Ministerio de Agricultura (1973), p. 9.

¹¹² Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (1972), pp. 2-3.

Gráfico 3. Caudales alumbrados acumulados de aguas subterráneas en litros/segundo por el INC hasta 1972



Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Agricultura (1959), Comunidad de Albarraçin (1959), Murcia y Gomara (1959), Murcia (1960), Ministerio de Agricultura (1965) y Ministerio de Agricultura (1973).

Nota: En los periodos comprendidos entre el 1 de agosto de 1958 y el año 1965 y entre 1965 y 1972 se han considerado crecimientos anuales homogéneos independientes.

Aunque la labor del Estado en el alumbramiento de las aguas subterráneas llevada a cabo en el tercer cuarto del siglo XX, fundamentalmente a través del INC y posteriormente del IRYDA, se vio complementada desde el primer momento por la iniciativa privada y posteriormente continuada con intensidad, es indudable el trascendental papel de efecto demostración que la misma jugaría para el desarrollo de la agricultura española basada en este tipo de recursos hídricos.

5. Conclusiones

A pesar de que el Plan Nacional de Obras Hidráulicas de 1933 no contempló el potencial del aprovechamiento de las aguas subterráneas, poco después, a partir de la segunda mitad del siglo XX, estos recursos hídricos jugarían un papel trascendental en el desarrollo de la agricultura española y en especial en la de las regiones costeras mediterráneas. La superficie total de regadío mediante aguas subterráneas se incrementó entre 1955 y 1985 de tal manera que superó las nuevas superficies de riego con aguas superficiales habilitadas por los proyectos estatales de expansión del regadío, estimándose que en el año 2000 aproximadamente el 30% del regadío en España empleaba aguas subterráneas para satisfacer la demanda. Las razones que motivaron que el Estado dejara

en manos de los particulares y no prestara atención de una manera decidida a la explotación de las aguas subterráneas hasta la segunda mitad del siglo XX respondieron de forma sustancial a un bloqueo de tipo tecnológico, que impedía el aprovechamiento de los acuíferos profundos. Además, a esta situación España sumaría durante la década de los cuarenta las deficiencias de su política agraria y la precariedad de sus relaciones comerciales con el extranjero, en especial con los EEUU.

Desde los comienzos del siglo XX se fueron sucediendo una serie de mejoras menores en las bombas centrífugas empleadas en la elevación de aguas subterráneas que permitieron que a mediados de los años veinte existieran en el mercado equipos de bombeo verticales de diámetro menor de 500 mm en los que la distancia entre el motor situado en superficie y el cuerpo de la bomba alcanzaba los 120 m, estimándose que a finales de los años treinta esta tecnología estaba ya perfeccionada a nivel mundial. La situación política en España impidió que estos equipos estuvieran disponibles hasta finales de los años cuarenta, siendo intensamente utilizados ya en la década de los cincuenta.

Igualmente, las bombas electrosomergidas, inventadas en los años veinte para la industria del petróleo, fueron evolucionando y empleándose cada vez más en la captación de aguas subterráneas, considerándose que en los EEUU estos equipos se encontraban disponibles para los usuarios en general desde finales de los años cuarenta y llegando a España en la segunda mitad de la década de los cincuenta. De esta forma se abría la posibilidad de explotar niveles acuíferos en los que la distancia desde la superficie hasta el nivel del agua era mayor de 120 m, presentando la ventaja complementaria de requerir perforaciones subterráneas aun de menor diámetro que las bombas verticales.

La complementariedad tecnológica que se produjo con la difusión de ambas tipologías de bombas (verticales y sumergidas) y la evolución sufrida por los sistemas de perforación a lo largo del siglo XX revolucionó el uso de las aguas subterráneas en el mundo, pues se pudo pasar: de los pozos de grandes diámetros excavados a mano o puntualmente con la ayuda de explosivos o de sistemas simples de percusión¹¹³; a sondeos perforados por maquinaria a percusión y a rotación con diámetros menores de 600 mm, que alcanzaban espesores acuíferos anteriormente inaccesibles sin ser un factor limitante de su ejecución el tener que excavar a profundidades situadas por debajo del nivel del agua. De esta forma se podrían explotar nuevos recursos hídricos, los caudales alumbrados podrían ser mayores al aumentar la sumergencia de las bombas y se vería menos afectada la explotación de los sondeos por eventuales descensos regionales de los niveles piezométricos. Esta situación de madurez tecnológica tuvo lugar en España a partir de la década de los cincuenta del siglo XX.

Marcadas interdependencias tecnológicas, definidas por Nathan Rosenberg en su modelo conceptual del cambio tecnológico, son claramente reconocibles en la evolución experimentada en la segunda mitad del siglo XIX y la primera del XX en las tecnologías propias de la captación de aguas subterráneas, así como en su relación con las de la

¹¹³ Cuyas profundidades eran limitadas y en los que la complejidad de las labores de fondeo una vez alcanzado el nivel del agua provocaba que los espesor acuíferos atravesados fueran siempre reducidos.

industria del petróleo, Estas son: (1) la evolución de las bombas centrífugas horizontales hasta la invención de la bomba vertical, en la que se produce un claro ejemplo de efectos acumulativos de mejoras menores, al igual que sucedió con el empleo del tricono y de los equipos autoportantes para los sistemas de perforación a rotación; (2) las claras relaciones interindustriales que se establecieron entre la industria del petróleo y la de la captación de aguas subterráneas en el caso de las bombas electrosumergidas y de los sistemas de perforación a percusión y rotación; y (3) la relación entre los equipos de bombeo electrosumergidos y verticales de menos de 500 mm de diámetro con los modernos sistemas de perforación profundos capaces de horadar el terreno con diámetros de hasta 600 mm constituye un ejemplo de complementariedad.

Continuando con los planteamientos de Nathan Rosenberg: “ninguna ley simple de la naturaleza hace de la tecnología la causa del crecimiento económico o a éste la causa del avance tecnológico...La interacción entre la gente, las instituciones económicas, el crecimiento de los mercados y la tecnología constituyen la clave¹¹⁴”. Sin duda, la labor emprendida por el Instituto Nacional de Colonización, sobre todo a partir de la década de los cincuenta, es un claro ejemplo de la importancia del papel de las instituciones como complemento a los avances tecnológicos, tanto por su actuación directa en la ejecución de nuevas captaciones de aguas subterráneas, como por el fomento de la iniciativa privada mediante la ayuda técnica y económica prestada, el favorecimiento de la industria nacional de ejecución de captaciones y el importante efecto demostrativo que su labor supuso en el desarrollo agrícola de España durante la segunda mitad del siglo XX.

La inflexión que experimentó el desarrollo agrícola en la década de los cincuenta se vio fuertemente condicionada y facilitada por el nuevo escenario internacional, más tolerante con la dictadura del general Franco, y especialmente por las relaciones que se establecieron con los EEUU. La ayuda americana, además de suponer una importante ayuda económica a la maltrecha economía española, fue también trascendental para el desarrollo de las zonas agrícolas dependientes de aguas subterráneas, pues con ella llegarían: los modernos equipos de perforación y los sistemas de bombeo verticales comúnmente utilizados en los EEUU; la asistencia técnica y el asesoramiento de personal americano en el Ministerio de Agricultura; la formación de personal español en el United States Geological Survey; y la integración en los primeros años de personal americano en los equipos humanos al cargo del manejo de los nuevos sistemas de captación.

Integrado ya el Instituto Nacional de Colonización en el Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario, se estima que a finales de 1972 el total de las captaciones ejecutadas por la Sección de Sondeos habría permitido disponer de más de 2.000 hm³ de aguas subterráneas al año, cifra muy significativa si tenemos en cuenta que en 1994 se evaluó el aprovechamiento de este tipo de recursos hídricos en 5.500 hm³.

¹¹⁴ Vegara (1994), p. 37.

Bibliografía

- ACKERMAN, Edward A. y LÖF, George O. G. (1959): *Technology in American water development, Resources for the future*. The Johns Hopkins University Press, Washington.
- ANDREU, Jesús; ALMAZÁN, Ángel y TURÉGANO, Leopoldo F. (1932): *España. Anuario Estadístico de las producciones agrícolas y su comercio exterior en 1931*, Imprenta del Ministerio de Guerra, Madrid.
- ARUTUNOFF, Armais (1926): *Electrically-driven pump, n° publicación US1610726A*. United States Patent Office.
- ARUTUNOFF, Armais (1926): *Electrically-driven pump, n° publicación US1610726A*. United States Patent Office.
- BARCIELA LÓPEZ, Carlos; LÓPEZ ORTIZ, M^a Inmaculada y MELGAREJO MORENO, Joaquín (1996): “La intervención del estado en la agricultura durante el siglo XX”, en TEDDE DE LORCA, Pedro (ed.), *El Estado y la modernización económica, Ayer, Revista de Historia Contemporánea*, n° 21, Asociación de Historia Contemporánea y Marcial Pons, Madrid, pp. 51-96.
- BARCIELA LÓPEZ, Carlos y LÓPEZ ORTIZ, M^a Inmaculada (2003): “El fracaso de la política agraria del primer franquismo, 1939-1959. Veinte años perdidos para la agricultura española”, en BARCIELA LÓPEZ, Carlos (coord.), *Autarquía y mercado negro: el fracaso económico del primer franquismo, 1939-1959*, Crítica, Barcelona, pp. 55-94.
- BOMBAS IDEAL (1974): *Datos técnicos de hidráulica*. Bombas, Valencia.
- BOWMAN, Isaiah (1911): *Well-Drilling methods*, United State Geological Survey, Washington.
- CALATAYUD GINER, Salvador (1993): “El regadío ante la expansión agraria valenciana: cambios en el uso y control del agua (1800-1916)”, *Agricultura y Sociedad*, n° 67, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, pp. 47-92.
- CALATAYUD GINER, Salvador y MARTÍNEZ CARRIÓN, José Miguel (1999): “El cambio técnico en los sistema de captación e impulsión de aguas subterráneas para riego en la España Mediterránea”, en GARRABOU SEGURA, Ramón y NAREDO PEREZ, José Manuel (eds.), *El agua en los sistemas agrarios. Una perspectiva histórica*, Colección Economía y Naturaleza, Volumen XII, Serie Textos Aplicados, Fundación Argentaria, Madrid, pp. 15-39.
- CALATAYUD GINER, Salvador y MARTÍNEZ CARRIÓN, José Miguel (2005): “El cambio tecnológico en el uso de las aguas subterráneas en la España del siglo XX. Un enfoque regional”, *Revista de Historia Industrial*, n° 28, Departamento de Historia e Instituciones Económicas de la Universidad de Barcelona, Barcelona, pp. 81-114.
- CHAPMAN, Matthew T. y CHAPMAN, Mark C. (1920): *Deep-well pump. Specification of letters patent, n° publicación US1149633A*. United States Patent Office.

COMUNIDAD DE ALBARACÍN (1959): “Intensificación de sondeos para captación de aguas por el Instituto de Colonización”, *Agrupación Forestal*. Boletín Informativo de la Comunidad de Albarracín, nº 14, pp. 23-24, Albarracín.

CONSEJERÍA DE AGRICULTURA, PESCA Y MEDIO AMBIENTE DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA (2012): *Plan Hidrológico de la Demarcación de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas*, Sevilla.

DICKSON, Kathy (s.f.). Failing, George E. (1889-1976), *Oklahoma Historical Society*, Consultado el Septiembre 10, 2014, de <http://digital.library.okstate.edu/encyclopedia/entries/F/FA002.html>

ECHARY, A. (1876): “Aparatos hidráulicos más usuales”, en LÓPEZ MARTÍNEZ, Miguel (dir.), *Gaceta Agrícola del Ministerio de Fomento*, Tomo XII, Ministerio de Fomento, Madrid.

EMU-INDAR (1959): Anuncio comercial, *ABC*, Edición Madrid, 31-01-1959, p. 67, Madrid.

ESPAÑA (1941a): Decreto de 24 de junio de 1941 por el que se declara de interés general la colonización de la zona denominada Campo de Dalías en la provincia de Almería, *Boletín Oficial del Estado*, 7 de julio de 1941, nº 188, pp. 5.053-5.054.

ESPAÑA (1941b): Decreto de 27 de junio de 1941 por el que se declara de interés general la colonización de la zona denominada Saladares de Albaterra-Crevillente-Elche en la provincia de Alicante, *Boletín Oficial del Estado*, 26 de julio de 1941, nº 207, pp. 5.605-5.606.

ESPAÑA (1954): Decreto de 5 de febrero de 1954 por el que se declaran de alto interés nacional y de reconocida urgencia los trabajos de investigación y alumbramiento de aguas subterráneas que realice el Instituto Nacional de Colonización en cumplimiento de sus fines, *Boletín Oficial del Estado*, 16 de febrero de 1954, nº 17, p. 891.

FERRER, Ricardo (1936): Abastecimiento de aguas. Bombas e instalaciones hidráulicas, Madrid.

GACETA DE MADRID (24-07-1905): nº 205, p. 306.

GACETA DE MADRID (6-04-1907): nº 96, pp. 79-80.

GACETA DE MADRID (29-06-1910): nº 180, pp. 654-656.

GACETA DE MADRID (23-07-1926): nº 204, pp. 573-574.

GACETA DE MADRID (30-10-1926): nº 303, pp. 498-500.

GACETA DE MADRID (21-01-1927): nº 21, p. 448.

GACETA DE MADRID (27-01-1927): nº 27, pp. 366-369.

GACETA DE MADRID (13-03-1929) : nº 72, pp. 211-213.

GACETA DE MADRID (18-06-1929): nº 169, p. 1.622.

- GACETA DE MADRID (20-06-1953): nº 171, p. 3.737.
- GACETA DE MADRID (12-11-1953): nº 169, pp. 7.006-7.007.
- GARRABOU, Ramón (1990): “Sobre el atraso de la mecanización agraria en España (1850-1933)”, *Agricultura y Sociedad*, nº 57, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, pp. 41-77.
- GONZÁLEZ ASENSIO, Ángel (2013): “Aurelio Domínguez Martín”, en LÓPEZ-GETA, Juan Antonio y FORNÉS AZCOITI, Juan María (eds.), *100 Años de Hidrogeología en España*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, p. 531.
- GRUNDFOS (2004): *Manual de bombeo*, Grundfos Industry, Madrid.
- HUGHES, Howard R. (1909): *Drill. Specification of letters patent, n° publicación US930759A*. United States Patent Office.
- INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZACIÓN (1942): *Proyecto de captación de aguas freáticas en Aguadulce*, Almería.
- INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZACIÓN (1945): *Proyecto de captación de aguas en Aguadulce*, Almería.
- INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZACIÓN (1951): *Proyecto de instalación eléctrica del primer pozo del grupo de elevaciones nº 2 de Aguadulce*, Almería.
- KEYSTONE DRILLER COMPANY (1911): *Keystone oil and water drilling equipment catalog*, Beaver Falls, Pennsylvania.
- LAYNE, Mahlon E. (1911): *Well mechanism. Specification of letters patent, n° publicación US998186A*. United States Patent Office.
- LA ILUSTRACIÓN ESPAÑOLA Y AMERICANA (01-10-1872): Año XVI, nº XXXVII, Madrid.
- LA ILUSTRACIÓN ESPAÑOLA Y AMERICANA (15-12-1877): Año XXI, nº XLVI, Madrid.
- LA ILUSTRACIÓN ESPAÑOLA Y AMERICANA (15-08-1878): Año XXII, nº XXX, Madrid.
- LEHR, Jay; HURLBURT, Scott; GALLAGHER, Betsy y VOYTEK, John (1988): *Design and construction of water wells: a guide for engineers hardcover*, National Water Well Associaton, Van Nostrand Reinhold, New York.
- LÓPEZ JIMENO, Carlos; LÓPEZ JIMENO, Emilio; RAMIREZ ORTEGA, Antonio y TOLEDO SANTOS, José Marcos (2000): *Manual de sondeos. Tecnología de perforación*, Carlos López Jimeno, Madrid.
- LÓPEZ-GETA, Juan Antonio y FORNÉS AZCOITI, Juan María (2013): “El agua subterránea, protagonista de esta historia”, en LÓPEZ-GETA, Juan Antonio y FORNÉS AZCOITI, Juan María (eds.), *100 Años de Hidrogeología en España*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 17-34.

- LUPIANI, Rafael (1964): *Elevación de aguas con bombas y norias*, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, Fco. Javier y GISBERT GALLEGU, Juan (2014): “Unidad 2. Perforación de sondeos”. Curso de especialista en diseño y ejecución de sondeos de captación de aguas subterráneas, Universidad de Almería, Almería.
- MATALLANA VENTURA, Santiago (1951): *El agua en el campo*, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- MENÉNDEZ ORMAZA, Joaquín (1911): *Cómo se descubre el agua subterránea. Pozos artesianos. Sondeos y distintos sistemas de elevación*, Madrid.
- MESA Y RAMOS, José (1934): *Pozos artesianos y pozos de petróleo*, Madrid.
- MILANO, Miguel (1914): “Máquinas elevadoras de agua para riego”, *Hojas Divulgadoras de la Dirección General de Agricultura, Minas y Montes*, Año VII, nº 6, Ministerio de Fomento, Madrid.
- MONTENEGRO, Antonio (1894): *Arte de la explotación del agua en pozos, fuentes y alubramientos convirtiendo en subterráneas las torrenciales*, Madrid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1959): “Actividades del Instituto Nacional de Colonización, Captación de aguas subterráneas”, *Boletín Informativo del Servicio de Extensión Agrícola*, nº 17, pp. 6-8. Madrid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1965): *Instituto Nacional de Colonización. Memoria*, Madrid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA (1973): *IRYDA. Realizaciones en aguas subterráneas*, Madrid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2014a): *Proyecto del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar*, Madrid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2014b): *Proyecto del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura*, Madrid.
- MINISTERIO DE FOMENTO (1918): *Medios que se utilizan para suministrar el riego a las tierras y distribución de los cultivos en la zona regable. Resumen hecho por la Junta Consultiva Agronómica de las memorias de 1916, remitidas por los ingenieros del Servicio Agronómico Provincial*, Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2000): *Libro Blanco del agua en España*, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2004): *Cálculo del coste real del Trasvase del Ebro*, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1933): *Plan Nacional de Obras Hidráulicas*, Madrid.
- MURCIA VIUDAS, Andrés (1953): *Aguas subterráneas. Prospección y alumbramiento para riegos*, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- MURCIA VIUDAS, Andrés y GOMARA GRANADA, José María (1959): *Trabajos de captación de aguas subterráneas realizados por el Instituto Nacional de Colonización*, Reunión Internacional de la Asociación de Hidrogeología, Madrid.
- MURCIA VIUDAS, Andrés (1960): *Investigaciones de aguas subterráneas en el sudeste español*, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- MURCIA VIUDAS, Andrés (1966): *Aguas subterráneas. Prospección y alumbramiento para riegos*, Ministerio de Agricultura, Madrid.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN (1972): *Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir. España. Tecnología y coste de los sondeos de captación de aguas subterráneas en la cuenca del Guadalquivir*, Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo, Madrid.
- PI SUÑER, Carlos (1960): *Bombas centrífugas para riego, Catecismos del agricultor y del ganadero*, Calpe, Madrid.
- PUCHE RIART, Octavio (1996): “Historia de la hidrogeología y de los sondeos de agua en España y en el Mundo, desde sus orígenes hasta finales del siglo XIX”, *Boletín Geológico y Minero*, vol. 107-2, Instituto Geológico y Minero de España, pp. 80-99, Murcia.
- PUCHE RIART, Octavio (2013): “Encuadre histórico general: cultura, ciencia y tecnología de las aguas subterráneas”, en LÓPEZ-GETA, Juan Antonio y FORNÉS AZCOITI, Juan María (eds.), *100 Años de Hidrogeología en España*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 37-61.
- REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS (1914): Bomba eléctrica para pozo profundo, instalada en la fábrica hidráulica de Rockford (Estados Unidos), Publicación Técnica del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puerto, nº 2.500, pp. 113-114, Madrid.
- SÁNCHEZ PALLARÉS, Antonio (1995): *100 años de estudios hidrogeológicos en la Huerta de Murcia y Valle del Gaudalentin (1870-1970)*, Antonio Sánchez Pallarés (edit.). Murcia.
- SÁNCHEZ PICÓN, Andrés (1997): “Los regadíos de la Andalucía árida (siglos XIX y XX). Expansión, bloqueo y transformación”, *Áreas. Revista de Ciencias Sociales*, nº 17, Universidad de Murcia, pp. 109-128, Murcia.
- SCOTT, Floyd L. y GARFIELD, Lewis E. (1934): *Three-cone bit*, nº publicación US19833164. United States Patent Office.

TAKACS, Gabor (2009): *Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance*, Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., Burlington.

VEGARA CARRIÓ, Josep M^a (1994): “Cambio tecnológico, análisis económico e historia. La aportación de Nathan Rosenberg”, *Revista de Historia Industrial*, nº 5, Departamento de Historia e Instituciones Económicas de la Universidad de Barcelona, Barcelona, pp. 11-44.

VELASCO MURVIEDRO, Carlos (2006): *Un siglo de carteles en la agricultura española. 1870-1960*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

VILANOVA Y PIERA, Juan (1880): *Teoría y práctica de pozos artesianos y arte de alumbrar agua*, Imprenta y Fundición de M. Tello. Madrid.

WOLFE, Mikael (2010): *Mining water for the revolution: Marte R. Gómez and the business of agrarian reform in “La Laguna”*. Mexico. 1920s to 1960s, Working paper 371. Kellogg Institute. University of Notre Dame. South Bend.

WORTHINGTON (1925): Anuncio comercial, *La Vanguardia*, 18-01-1925, p. 22.

WORTHINGTON (1926a): Anuncio comercial, *La Vanguardia*, 14-01-1926, p. 5.

WORTHINGTON (1926b): Anuncio comercial, *La Vanguardia*, 12-10-1926, p. 5.