

Las obras hidráulicas en la Cuenca del Ebro¹

Labor de la Confederación

La navegabilidad del Ebro y sus puertos exteriores

El proyecto de navegabilidad del Ebro, de indiscutible importancia para la economía de extensas

de su apogeo una matrícula de embarcaciones bastante nutrida, que, aunque de pequeño tonelaje, salían al mar, salvando el hoy infranqueable obstáculo de la barra.

Las causas de la decadencia de esta navegación son de dos órdenes: en primer lugar, el pequeño tonelaje de las embarcaciones les impidió competir con los ferrocarriles que actualmente sirven a los puertos del Mediterráneo; y en segundo término, con el transcurso del tiempo han ido empeorando las condiciones de la barra, que siempre han debido ser muy malas. Ambas causas han determinado la total desaparición de la navegación marítima, no subsistiendo actualmente en el Ebro más que pequeños laúdes de navegación interior.

Este estado de cosas no es privativo del Ebro, repitiéndose en ríos de características análogas. Consideremos, por ejemplo, el caso del Ródano, en que la ciudad de Arles puede compararse, en cuanto a su situación, con la de Tortosa. Arles ha tenido, desde los más remotos tiempos, importancia como puerto fluvial, y sus embarcaciones salían al mar y mantenían un activo comercio con todo el Mediterráneo. Todavía en el año 1842 entraban y salían de su puerto 1 900 embarcaciones anuales, mientras que hoy en día sólo le resta, por causas parecidas a las que han originado la desaparición de la navegación marítima del Ebro, un tráfico muy reducido y

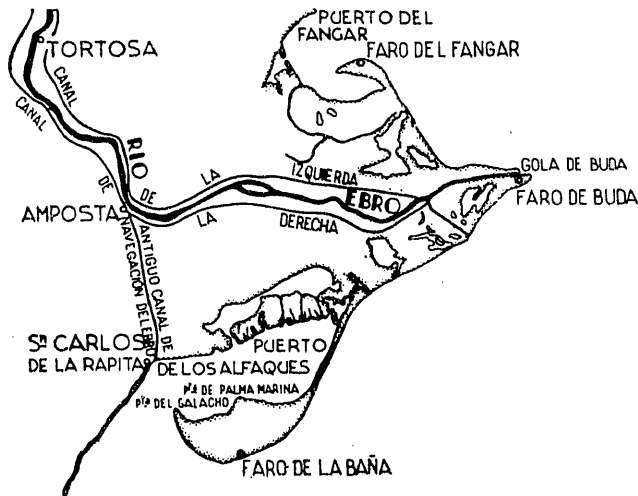


Fig. 1.ª Plano general del delta del Ebro

zonas productoras de su cuenca, ha sido considerado siempre como de muy difícil solución, dando lugar a un ambiente de escepticismo que los detenidos estudios que desde su fundación realiza la Confederación han contribuido a disipar. Creemos de interés la publicación de estas notas, que habrán de concretarse a exponer una pequeña parte de los trabajos realizados, refiriéndonos más especialmente, aunque el estudio completo haya abarcado más de 225 km de cauce, a la parte inferior del río, que es la que mayores dificultades presenta, y cuyo estudio, único en esta materia realizado en España, ha sido efectuado bajo la dirección de D. Manuel Lorenzo Pardo, director técnico de la Confederación del Ebro, y de D. Justo Vilar, ingeniero jefe asesor de la misma, cuyos nombres son garantía de la orientación que el ingeniero que suscribe ha procurado seguir fielmente.

Es indudable que en la parte baja del Ebro ha existido una activa navegación que tenía como centro a Tortosa, llegando a tener esta ciudad en tiempos

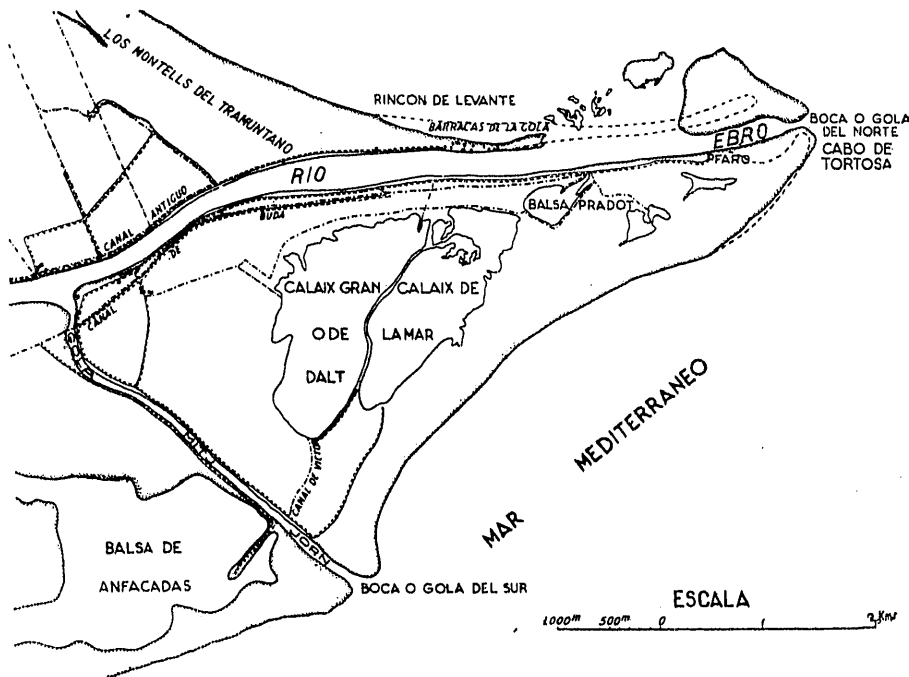


Fig. 2.ª Desembocadura del Ebro el año 1929. La línea de puntos representa la desembocadura en 1915.

meramente fluvial. La analogía de la desembocadura del Ródano con la del Ebro es verdaderamente sorprendente y muestra hasta qué punto causas parecidas pueden producir efectos semejantes. Las figu-

¹ Véase la REVISTA de 1.º de octubre último, pág. 390.

ras 2.^a y 3.^a dan clara idea de esta semejanza y puede verse que hasta el brazo secundario, llamado del Mitg-Jorn o del Sur, se halla reproducido en el Grau de Piémanson, si bien este último se halla actualmente cerrado por el dique de encauzamiento. La barra es igualmente de características muy parecidas, según

tenue en suspensión, el cual, en gran parte, se mantiene a flote sobre las aguas del mar que en forma de cuña penetran en la desembocadura. El esquema de la figura 7.^a da idea de la repartición de las aguas, debiendo hacerse notar que la línea de separación (que en realidad es una zona) puede cambiar notablemente de posición, introduciéndose a veces a distancias considerables aguas arriba, ocasionando la regresión de la barra. El caudal sólido que las aguas del río mantienen en suspensión puede ser llevado, antes de precipitarse, por los vientos y corrientes hasta distancias considerables, contribuyendo, como luego veremos, al crecimiento del delta en lugares alejados de la desembocadura.

La diferente configuración de la barra del Danubio que señalábamos en el párrafo anterior, se explica, una vez expuesto el proceso de formación, por la menor densidad del agua del Mar Negro, que es, apro-

ximadamente, de 1,017, produciéndose el fenómeno en condiciones distintas.

Soluciones para salvar una barra

Teóricamente, la mejor solución para evitar la formación de una barra como la del Ebro sería la

se deduce de las figuras 4.^a y 5.^a, correspondientes a los años 1893 y 1915, respectivamente. Posteriormente, la barra del Ebro ha sufrido radicales cambios (línea de puntos de la figura 4.^a), a causa de haberse abierto camino el Ebro vertiendo al mar sobre una gran extensión de su margen izquierda (fig. 2.^a). En la figura 6.^a se representa la barra del Danubio, que también vierte a un mar sin mareas apreciables, y sin embargo es de características completamente distintas, como corresponde a un proceso de formación totalmente diferente.

Formación de la barra

El proceso de formación de la barra del Ebro viene a ser, en líneas generales, el siguiente: el agua del mar

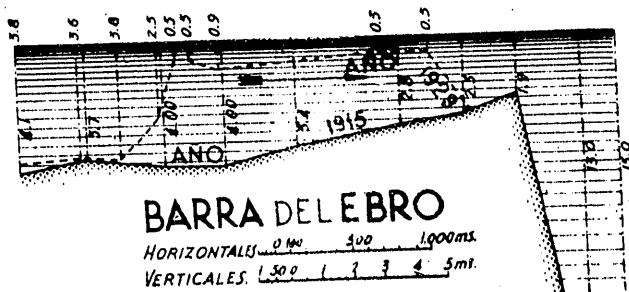


Fig. 4.^a Perfil de la barra del Ebro a lo largo del talweg. La línea llena representa el estado del año 1915, y la punteada, el de 1929

frente a la desembocadura tiene una densidad que se acerca a 1,03. Las aguas del río cargadas de material en suspensión son de menor densidad, y al desembocar en el mar no se mezclan inmediatamente con sus aguas, sino que se elevan y se extienden en capa superficial hasta distancias considerables, hecho que se reconoce por el distinto color de las aguas. Al elevarse las aguas del río, abandonan el caudal sólido más pesado, en particular el que arrastran por el fondo, que es el que principalmente forma la barra, y no, como generalmente se cree, el material

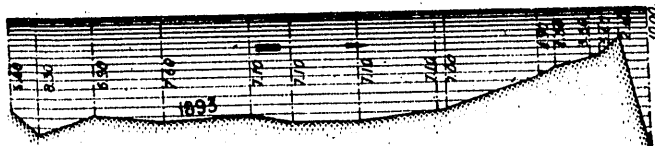


Fig. 5.^a Perfil de la barra del Ródano, según el talweg, en el año 1893

que consiguiese que las aguas del río se introdujesen en el mar en corriente submarina, análogamente a lo que sucede en los ríos que desembocan en lagos de aguas menos densas que las propias, abriéndose un

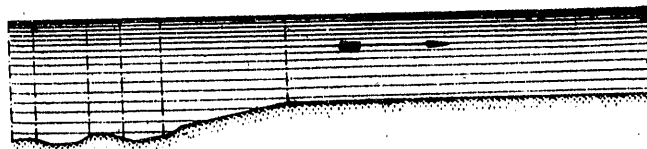


Fig. 6.^a Perfil de la barra del Danubio

cauce submarino en vez de formar barra. Sin embargo, no se vislumbra la posibilidad de conseguir nada en ese sentido, y habrá que recurrir o bien al encauzamiento y dragados en la desembocadura, o a la construcción de un canal lateral que evite el paso por la barra.

Encauzamiento

La solución de encauzar la corriente principal en una única dirección, cerrando al mismo tiempo, por

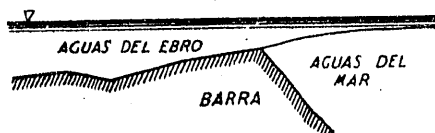


Fig. 7.º Esquema de formación de la barra del Ebro

medio de diques longitudinales, las golas secundarias, que con tanta facilidad se abren en los deltas, es la más simplista, y todavía tiene sus partidarios, aunque suponemos que no será entre los técnicos. El encauzamiento longitudinal ha dado buenos resultados en ríos como el Danubio, que, como hemos dicho, desemboca en un mar de densidad relativamente pequeña; pero sería temerario pretender adaptarlo al Ebro sin tener en cuenta el diferente proceso de formación de su barra. Afortunadamente para nosotros, ha habido quien ha hecho la experiencia con anterioridad, obteniendo el rotundo fracaso que era de temer. Nos referimos a los trabajos que en los años 1852 a 1857 fueron ejecutados en el Ródano, sobre los que es interesante saber lo que dice, en publicación del propio *Ministère des Travaux publics*, el ingeniero jefe de *Ponts et Chaussées*, encargado de la dirección del puerto de San Luis en el Ródano: «... les résultats obtenus», dice, «ont été absolument nuls; la passe sur la barre n'a pas en plus

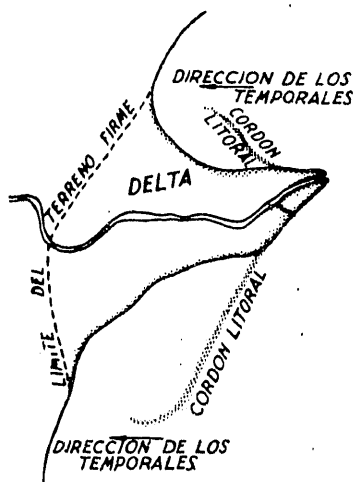


Fig. 8.º Formación de cordones litorales y albuferas

de stabilité qu'antérieurement, le tirant d'eau n'a pas été augmenté¹. El único efecto que se consiguió fué un

momentáneo rebajamiento de la barra después de las avenidas, hasta que la acción combinada del río y del mar la restablecieron un poco más lejos con características análogas. No cabe duda que en el caso del Ebro, tan parecido por todos conceptos, aunque más desfavorable por su menor caudal de estiaje, no se obtendrían mejores resultados, quedando en absoluto descartada toda solución de acondicionamiento del cauce que trate de aprovechar la actual desembocadura para la navegación.

Canal lateral

Queda, por lo tanto, únicamente la solución de un

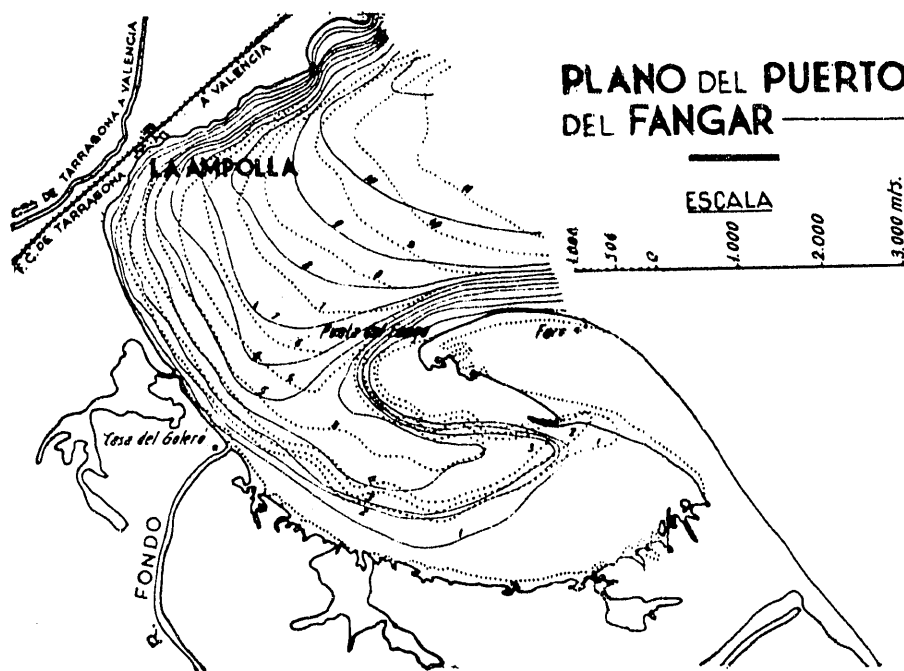


Fig. 9.º Plano del puerto del Fangar en 1929. Las líneas de puntos representan la situación en 1883.

canal lateral que partiendo de un punto conveniente del cauce desemboque en el mar al abrigo de los temporales. En el mismo Ródano se ha tenido que recurrir a esta solución, creando el canal de San Luis después del fracaso del encauzamiento. Las soluciones posibles en nuestro caso pueden reducirse a tres:

- 1.ª Aprovechamiento del cauce del río hasta cerca de su desembocadura, con canal lateral de unos 300 m que desemboque en el llamado Rincón de Levante (fig. 2.ª).
- 2.ª Canal lateral de unos 10 km de longitud, que desemboque en el puerto del Fangar.
- 3.ª Canal lateral de longitud análoga, desembocando en el puerto de los Alfaques.

Las tres soluciones han sido cuidadosamente estudiadas por la Confederación. La primera de ellas no ofrece ventaja alguna y apenas hubiera merecido atención a no figurar a su favor el informe de una Comisión técnica que al estudiar la posibilidad de crear en Tortosa un puerto de refugio para torpederos, la propuso, protegiendo la desembocadura del canal por un dique que avanzase en el mar hasta ganar la profundidad de 9 m. Como es natural, este dique, suponiendo factible su construcción, sólo podría proporcionar un abrigo insuficiente para que las embarcaciones pudieran realizar operación tan delicada

¹ Les Ports maritimes de la France, tomo VII, pág. 527.

como la entrada en el canal con mar gruesa. Sería muy difícil mantener libre la entrada del canal por estar situada en la parte del delta en que el crecimiento es más rápido; y, por otra parte, dada la escasísima consistencia del delta en esta zona de tan reciente formación, sería imposible conseguir una fundación

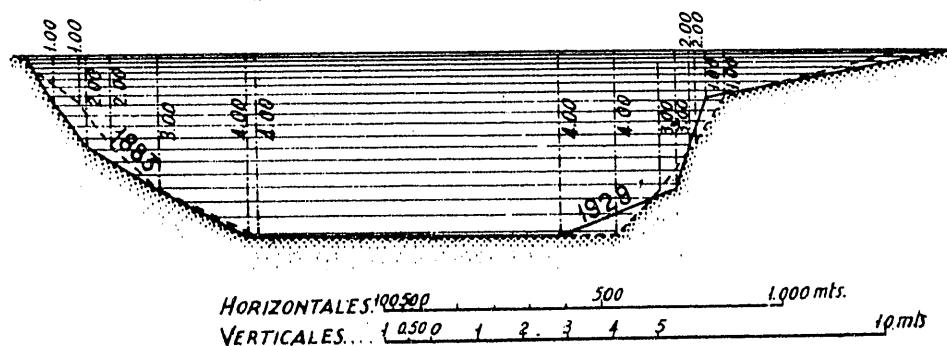


Fig. 10. Perfiles comparados del puerto del Fangar

capaz de resistir los embates de los menores temporales. La conservación del canal sería asimismo difícilísima, por la poca estabilidad del terreno. La economía que pudiera conseguirse por la pequeña longitud del canal quedaría desfavorablemente afectada por el gasto necesario para el acondicionamiento y conservación de cerca de 30 km de cauce de río desde Amposta, cuyas condiciones necesitan una radical mejora, si había de utilizarse como vía navegable para barcos de algún calado. Por último, esta solución alargaría el recorrido desde Amposta al mar en cerca de 20 km, lo cual supone triplicar el que se obtendría con la solución 3.ª, por ejemplo.

Puertos exteriores del Ebro

Quedan, pues, únicamente como técnicamente viables las soluciones de salida al mar por canal lateral que desemboque en uno de los puertos naturales del Fangar o los Alfaques, y en lo que sigue nos limitaremos a consignar los resultados más interesantes del detenido estudio que de estos puertos ha realizado la Confederación estos últimos años, estudio que aún está en marcha, proyectándose ahora aplicar la experimentación sobre modelo, para aclarar algunos puntos sobre el crecimiento del delta y peligro de cierre de estos puertos¹.

Como hemos dicho anteriormente, las aguas del río, cargadas de materias en suspensión, flotan durante mucho tiempo sobre las aguas del mar, pudiendo recorrer grandes distancias impelidas por los vientos y corrientes antes de precipitar todo su caudal sólido. Las corrientes litorales dominantes parecen tender a arrastrar esas aguas a lo largo de la costa arenosa del delta, mezclándose poco a poco con las del mar, a las que ceden su caudal sólido, que acaba por ser depositado en las playas, contribuyendo así al crecimiento del delta en puntos alejados de la desembocadura. El crecimiento del vértice del delta es, sin embargo, mucho más rápido, y llegaría a adquirir una forma como la indicada en el croquis de la figura 8.ª. Parece demostrado que la figura de equilibrio de una

costa arenosa batida por el mar es la de una curva de pequeña concavidad dirigida hacia el mar. Cuando por cualquier causa se forman ensenadas más profundas, el oleaje forma por sí solo un cordón litoral como los indicados en la figura, pudiendo llegar a convertir en laguna cerrada extensas superficies.

Notables ejemplos de estos cordones litorales son las ensenadas Frische Nehrung y Putziger Nehrung, de la Prusia Oriental. Experimentos realizados últimamente demuestran que estos cordones litorales se forman preferentemente cuando la profundidad es igual a la altura de la ola, de cresta a seno¹, profundidad que puede llegar a ser bastante considerable. En nuestro caso, el proceso de formación queda

influído y acelerado por las turbias aguas del río, que al ir precipitando su caudal sólido, crean zonas de pequeña profundidad en que rápidamente se forman cordones litorales que originan ensenadas, abiertas al principio, pero con indudable tendencia a cerrarse. Una vez cerrada una de estas ensenadas, se colmata rápidamente por la acción de los vientos y de los desechos cargados de limo que a ella vierten, consiguiéndose de este modo un rápido crecimiento del delta en regiones a las que no llega directamente el agua del río. Los puertos naturales del Fangar y los Alfaques no tienen proceso de formación distinto, y, por lo tanto, lo primero que se ocurre al estudiarlos como puertos del Ebro es su eventual posibilidad de cierre y colmatado. Estudiaremos primero el puerto del Fangar. Es una bahía natural cuyas características pueden verse en la figura 9.ª, simplificación del plano obtenido por la Confederación en 1929. Como los temporales más violentos son los de Levante

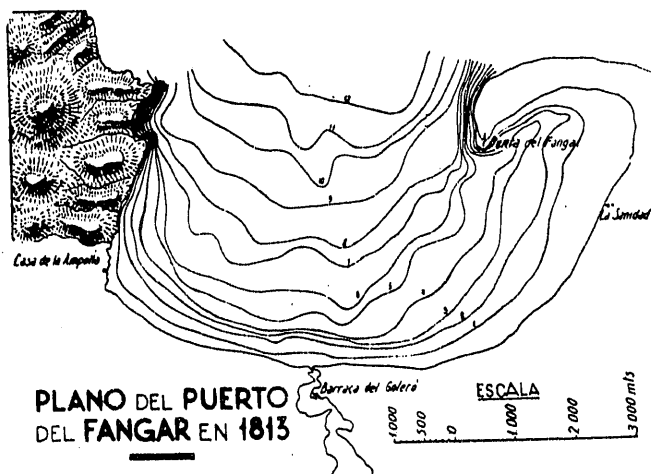


Fig. 11. El puerto del Fangar en 1813, según el plano de la Comisión Hidrográfica. Aunque la planimetría no merece confianza, pueden apreciarse las reducidas dimensiones de la punta del Fangar

y SE., la entrada de la bahía queda expuesta a los primeros y la única zona abrigada es la interior, cuyas profundidades apenas llegan a los 4 m. El canal

¹ Véase *El estudio experimental del tramo bajo del Ebro*, memoria presentada por el autor a la Conferencia Mundial de la Energía de Barcelona, junio 1929.

¹ Véase *Hydraulic Laboratory Practice*, New-York 1929, página 529.

que desembocase en este puerto tendría que hacerlo en la zona de pocas profundidades del interior, y su trazado se desarrollaría por pleno delta en terreno inestable y muy suelto. Comparado el plano de la

fil de la figura 10. El proceso del crecimiento de esta punta, que fué rapidísimo en la primera mitad del siglo pasado, según puede comprobarse comparando las figuras 9.^a y 11, es mucho más lento a partir del

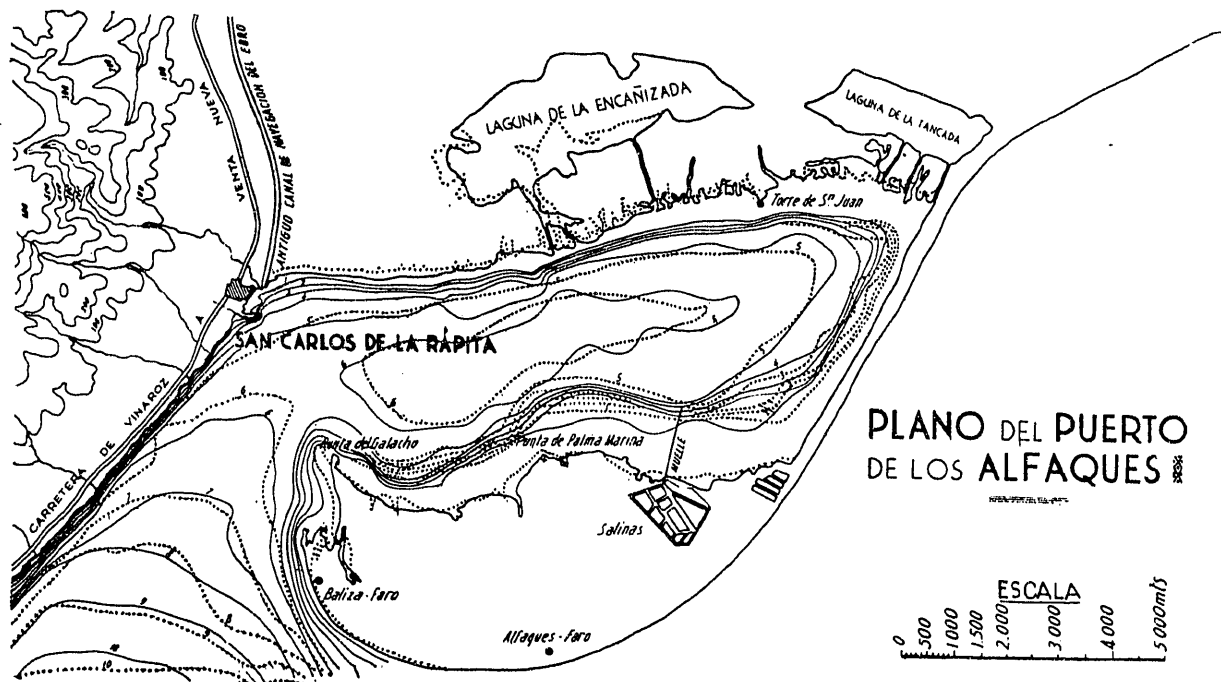


Fig. 12. Plano del puerto de los Alfaques en 1929. Las líneas de puntos representan el estado de 1881

Confederación con el levantado en 1883 por la Comisión Hidrográfica del Ministerio de Marina, pueden apreciarse las variaciones experimentadas durante estos cuarenta y seis años. Como podía esperarse, no han disminuido, sino más bien aumentado, los calados de la embocadura expuesta a los temporales

año 1883; pero, sin embargo, aun resulta desfavorable, pues tiende a cerrar la única zona abrigada del puerto, ya de por sí muy poco profunda. En vista de lo anterior, no puede afirmarse que el puerto del Fangar tenga buenas condiciones; canal de acceso por terreno desfavorable, entrada expuesta al levante,

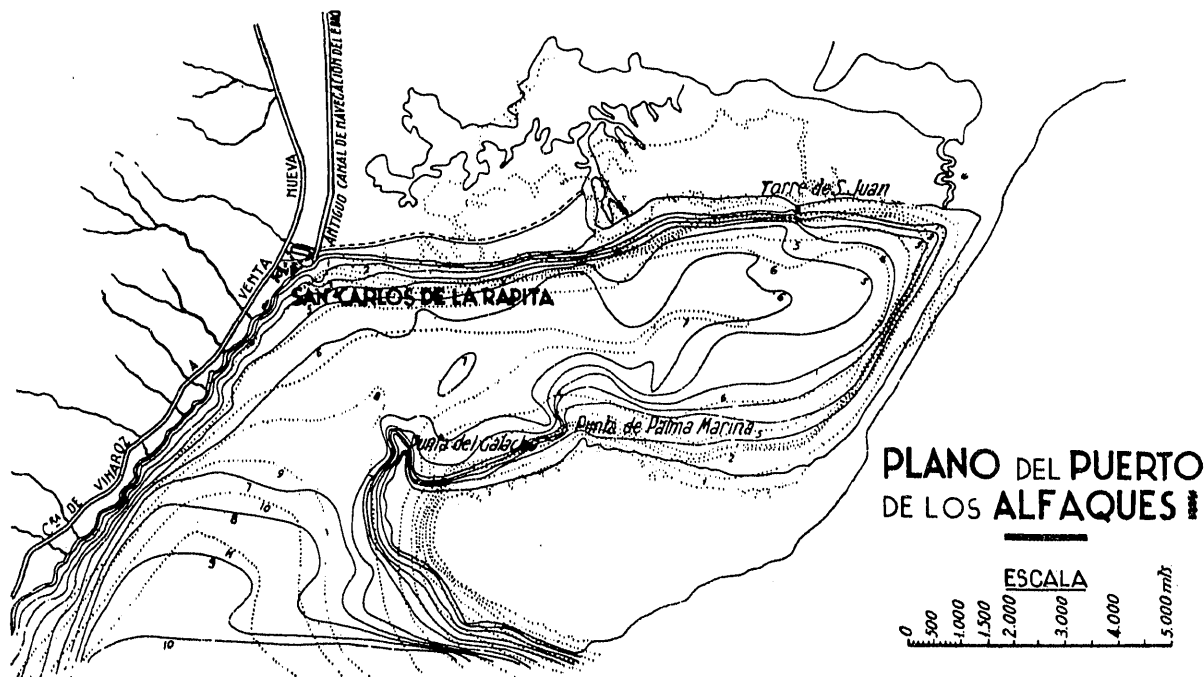


Fig. 13. Plano del puerto de los Alfaques en 1858. Las líneas de puntos representan el estado de 1811

de Levante, los cuales, al batir la entrada al puerto, determinan que el crecimiento de la punta del Fangar se verifique en dirección E.-O., produciendo las disminuciones de calado que pueden apreciarse en el per-

poca profundidad y amenaza de cierre de la zona abrigada. Sin embargo, todo es relativo, y si no se encuentra otro mejor, podría pensarse en su utilización como puerto marítimo del Ebro.

Puerto de los Alfaques

Un proceso parecido al que ha dado lugar a la formación del anterior ha creado en la zona derecha del delta del Ebro el vasto puerto de los Alfaques, resguardado de todos los temporales y del que pueden abrigarse los mismos temores en cuanto a la posibilidad de cierre de su entrada y colmatado de su in-

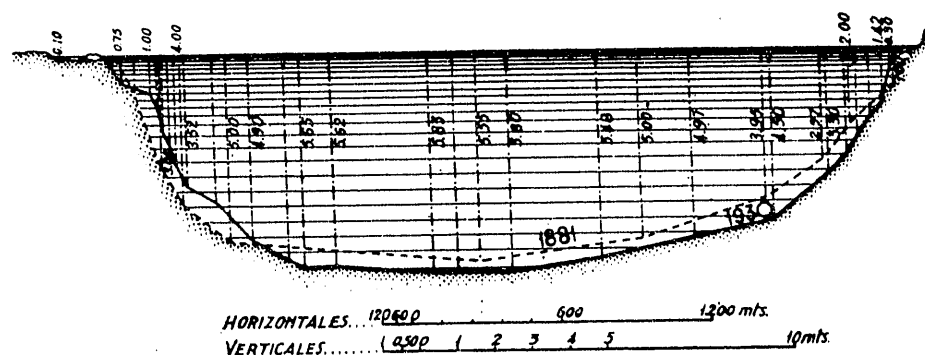


Fig. 14. Perfiles comparados del puerto de los Alfaques

terior. También este puerto ha sido estudiado con gran detalle por la Confederación, y reproducimos en la figura 11, en síntesis, el plano levantado en 1929.

Este plano puede compararse con los de la Comisión Hidrográfica de los años 1811, 1858 y 1881, con lo cual tendremos la historia de este puerto durante un período de 118 años, muy suficiente para darse completa cuenta de la marcha del proceso de su formación. Los planos de las figuras 12 y 13 son tan elocuentes que apenas necesitan explicación. Hasta el año 1858 el crecimiento de la punta del Galacho y el colmatado del interior es muy rápido, continuando en forma análoga, aunque con menor intensidad, hasta el año 1881, en que ya la punta del Galacho tiene una forma muy parecida a la actual. Al adquirir esta configuración, la misma punta dificulta la entrada en el interior de las aguas fluviales, que a lo largo de la costa son empujadas por las corrientes, y las desvía hacia el O., verificándose en estos últimos cuarenta y ocho años el crecimiento, principalmente en la dirección E.-O.; pero, como puede ob-

servarse en el perfil de la figura 14, la profundidad mínima de la entrada no sólo no ha disminuído, sino que ha aumentado algo. Este beneficioso efecto de la punta del Galacho podría aumentarse artificialmente por la construcción de estacadas que avanzasen hacia el mar y produjesen el depósito de las arenas y limos en dirección conveniente, sin permitirles la entrada en el interior del puerto. El peligro de cierre de este puerto es, pues, remoto. En cuanto al colmatado por los desagües de los arrozales que vierten al interior del puerto, puede comprobarse por los planos que no tienen acción apreciable sobre las profundidades, como era de esperar, dada la pequeñez de los arrastres totales. El canal de acceso a este puerto se desarrollaría en general por terreno aceptable.

El plan de navegabilidad del Ebro, estudiado por la Confederación, se completa con una obra de contacto entre la navegación marítima y la fluvial, que hará posible, una vez acondicionado el tramo fluvial, establecer un medio de tráfico económico y de gran capacidad entre el interior de la cuenca y el mar, permitiendo al mismo tiempo un completo aprovechamiento hidroeléctrico del tramo bajo industrial del río y ofreciendo por sí mismo medios económicos de garantizado rendimiento.

No nos extenderemos en más detalles, aunque el tema se presta a ello, y terminaremos con la afirmación, que no creemos demasiado optimista, de que el problema de la salida al mar de la navegación del Ebro, cuyo estudio, gracias a la Confederación, ha salido ya de la fase inicial para entrar en la esfera de posibles realidades, aunque complicado, no es de tan difícil ni costosa solución como se ha supuesto: un canal de unos 10 km de longitud por terreno relativamente fácil y unas obras de acondicionamiento y conservación equivalentes a las de cualquier puerto de pequeña categoría del Mediterráneo, no creemos puedan asustar a nadie, si se tiene en cuenta la magnitud de los beneficios que reportarían.

José CRUZ LÓPEZ
Ingeniero de Caminos

Cálculos de estabilidad de la presa del Burguillo¹

II

Para obtener las expresiones de n_1 estableceremos el equilibrio de los mismos trozos de rebanada, proyectando las fuerzas que sobre ellos actúan, sobre el eje de las x .

Así, hallamos:

Entre

$$x = x_0 \quad \text{y} \quad x = -2$$

$$t_{x_0} \times 2z_0 \times \frac{dx_0}{dy} dy + 2 \int_{x_0}^x t \left(\frac{dz_0}{dy} \right) dy \cdot dx - \\ - \int_{x_0}^x \frac{dt}{dy} \cdot dy \times 2z_0 \times dx - n_1 \times 2z_0 \times dy = 0$$

$$n_1 = t_{x_0} \frac{dx_0}{dy} + \frac{1}{z_0} \int_{x_0}^x t \left(\frac{dz_0}{dy} \right) \cdot dx - \int_{x_0}^x \frac{dt}{dy} \cdot dx$$

y como:

$$t = n_{x_0} \times \frac{dx_0}{dy} + \frac{1}{z_0} \int_{x_0}^x n \left(\frac{dz_0}{dy} \right) \cdot dx - \\ - \int_{x_0}^x \frac{dn}{dy} \cdot dx - \pi(x - x_0) \dots \quad t_{x_0} = n_{x_0} \frac{dx_0}{dy}$$

¹ Véase el número anterior, página 417.