

Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Geología, Facultad de Ciencias  
Zaragoza, Septiembre 2019

# **Evolución del Delta del Danubio desde épocas históricas hasta la actualidad**

Raquel Morales Calleja

Tutor: Dra. Gloria Desir Valén

## ÍNDICE:

1. Abstract
2. Introducción
3. Objetivos del trabajo
4. Metodología
5. Área de estudio
  - 5.1. Situación geográfica
  - 5.2. Situación geológica
6. Resultados y Discusión
  - 6.1. Delta actual
  - 6.2. Análisis geomorfológico y evidencias evolutivas
  - 6.3. Evolución del delta
    - 6.3.1. Causas principales de los cambios
    - 6.3.2. Evolución morfológica asociada a dichos cambios
7. Conclusiones
8. Bibliografía

## Anexos:

- I. Mapa geomorfológico actual. Cartografía geomorfológica completa
- II. Mapa unidades actuales
- III. Mapa de suelo del delta
- IV. Mapas históricos

## 1. Abstract.

The river Danube is one of the most important rivers in Europe. From its birth, in the German region of Donaueschingen until its mouth in the Black Sea, in Romania and Ukraine, it flows through ten European countries, some of them members of the European Union. At its birth, it shares flow with the Rhine that makes its journey north.

Since civilizations settled in Europe, the Danube has been a widely used river. It has served as a supply for consumption, agriculture, and livestock. Furthermore, it has been used as a defense in wars and as an access route in conquests. There is archaeological evidence of Neolithic settlements in its channel. Later empires like the Greek, the Roman, Byzantine, and Turkish built civilizations along with the river founding cities and temples. It also served as a trade route between different civilizations, since it was navigable and was direct access to the Black Sea. During the Industrial Revolution, the river began to be used as a source of supply and place of discharge, which began to heavily pollute its waters. In the First and Second World War, it was a location of crucial importance for its relief and geology, it served as a defense and an area of attack among the troops of the different countries. Currently, there are still political conflicts, legislative rather than warlike, especially between Romania and Ukraine, where the mouth of the Danube is located in the form of a delta.

The delta is the part of the river that has changed, both natural and of anthropic origin. It depends especially on the amount of sediment contribution and water load that arrives from the river and is distributed unevenly among the different main channels: Chilia, Sulina, and St. George. This contribution has varied over time by geological modifications, such as the lifting of the Carpathian Mountains and the modification of the channel orientation; and also by the system of sluices, dams and swamps, of artificial origin, that make the river navigable throughout its route.

Besides, the coastline along with the formation of the different delta lobes is conditioned by the natural currents of the Black Sea that cause a coastal drift towards the S-SW. This coastal drift acts as a guide for the deposit of sediments that arrive from the river and those that carry the sea current itself.

The evolution of the delta has been carried out in different stages depending on its geological conditions at each time. First, there was a fork of the main channel of the Danube in two channels, Chilia and Tulcea. The Chilia continued its course towards the north forming three successive lobes at different times, until the present one that is the one that has more activity of the three. The Tulcea channel continued eastward, where it undergoes an uptake to the south and is divided into two other channels, Sulina, which continues eastward, and St. George that begins its journey southward formed two other successive lobes. These three main channels are associated with many secondary channels that connect with different inland lakes and lagoons that are remnants of ancient lobes and canals.

In addition to its evolution, morphology, and situation, the Danube Delta is very important as it is a Biosphere Reserve and World Heritage Site for its ecology and biology. It is one of the most important wetlands in the world.

## 2. Introducción.

El río Danubio es uno de los ríos más importantes y más presentes en la historia de Europa. Ha sido núcleo de civilizaciones, vía de comercio para muchas de ellas; ha servido como fuente principal de abastecimiento, para ganadería y cultivos; incluso como inspiración artística. El Danubio fluye atravesando 10 países de Europa hasta llegar a la costa de Rumanía, donde desemboca en el Mar Negro. La longitud y navegabilidad del Danubio hacen que su gestión y explotación sea altamente compleja. Cada país que atraviesa tiene su propia política en relación al río, y solo algunos de ellos se rigen por la política de aguas de la UE. Todos estos factores unidos a la compleja evolución que ha sufrido controlada tanto por los factores geológicos como por los cambios introducidos por la acción antrópica, especialmente en su zona deltaica, hacen que sea un tema destacable de estudio.

El delta del Danubio ha sido el tramo que más cambios ha sufrido estos últimos siglos. Estos cambios son patentes si se analizan las diferentes cartografías históricas existentes. La primera evidencia cartográfica del Danubio la encontramos hace 2500 años, Heródoto de Halicarnaso (Fig. 1), geógrafo e historiador griego, describió un delta compuesto por siete brazos. Los cambios sufridos por el delta en los últimos siglos también se han reflejado en cartografías de la época (Fig. 2).

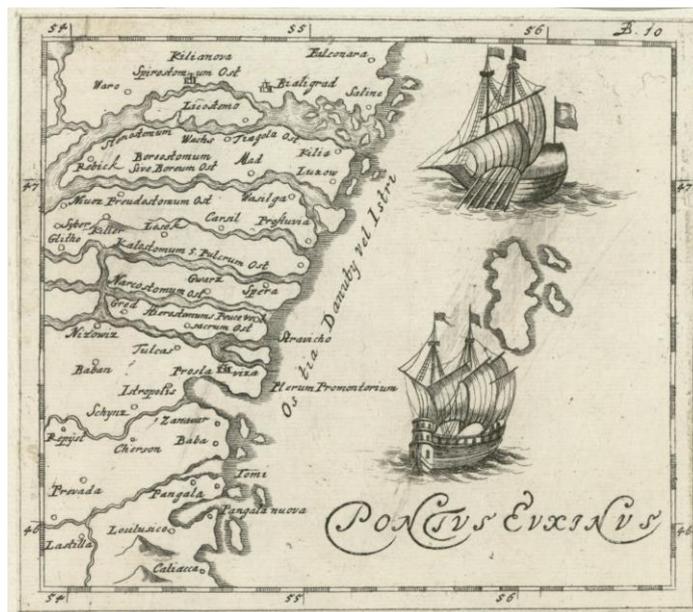


Figura 1. Plano cartografiado por Heródoto de Halicarnaso hace 2500 años. En él se observan los siete brazos que componían la desembocadura del Danubio y sus respectivos estuarios.

Las primeras evidencias de asentamientos habitados en el delta son del Neolítico, instrumentos de caza o restos arqueológicos, se han encontrado en las primeras fases del delta. También se encuentran importantes ruinas de dos ciudades griegas, Histria y Argamum construidas en la parte norte del delta, entre dos antiguos lagos. Se sospecha la existencia de una tercera ciudad griega, Archilea, donde actualmente encontramos el Chilia I (al que hacemos referencia más adelante). Posteriormente, en el s. X, en el periodo bizantino, se fundó la ciudad Sulina. Durante el Imperio Turco, que comenzó a principios del s. XV, se formaron nuevos asentamientos,

Caraoman. Los cambios antrópicos importantes al delta se realizaron a partir del s. XIX con la creación de una Comisión Europea del Danubio (1856), que fue la encargada de realizar todos los trabajos de ingeniería hidráulica, como presas y pantanos. El último asentamiento establecido es Maliuc, fundado en 1953. Todas estas poblaciones a lo largo de la historia han modificado y contaminado el río debido a su aprovechamiento, lo cual se evidencia claramente en el punto final del mismo, el delta. Como ya se ha señalado estos cambios aparecen plasmados en las diferentes cartografías que se han realizado a través de la historia. Los más evidentes son apreciables cuando se comparan las cartografías de la época romana (Fig.1) con las de los siglos XVII y XVIII, donde se observa un cambio en la naturaleza propia del delta con el paso de condiciones de estuario a delta. Este cambio se debió producir en algún momento entre la época romana de la que datan las primeras cartografías y el siglo XVIII. Ya que las cartografías pertenecientes a esta época muestran como las bocas del Danubio terminan en diferentes estuarios (ANEXO IV). A partir de ese momento los cambios son menores, aunque se producen con una mayor celeridad, claramente influenciados por los cambios introducidos por el hombre en algunos sectores. Así, si observamos las cartografías que aparecen en la figura 2 vemos como existen cambios tanto en el trazado de los canales como en el propio delta tanto por la progradación del edificio deltaico, en los brazos del Sulina como del St. George. Siendo especialmente significativo la progradación y ampliación del delta en la zona del brazo del Chilia (Fig.2).



Figura 2. Planos cartografiados en 1771 (a) y 1856 (b).

Los cambios sufridos por el delta se deben a tres causas principales, dos naturales y otra de origen antrópico, como comentaremos más adelante. Las causas naturales principales son la acción de las corrientes y el oleaje del Mar Negro sobre la línea de costa del delta y el levantamiento del sistema montañoso que atraviesa el río en el final de su recorrido, los Montes Cárpatos, ambas causas provocan cambios en la morfología del delta principalmente por el aumento de la tasa de acreción. La causa antrópica, como su propia descripción indica, está provocada por la acción del hombre sobre el río durante siglos, hacerlo navegable, los sistemas de esclusas o los vertidos a partir de la Revolución Industrial, hacen que la geología cambie a otro ritmo que no sea el natural.

### **3. Objetivos del trabajo.**

Los objetivos que se plantearon para la realización de este trabajo fueron:

- Realizar una cartografía y un análisis geomorfológico basado en fotografías de satélite y cartografías antiguas del delta del Danubio.
- Analizar el tipo de cambios y establecer los factores que los han controlado tomando como base la cartografía geomorfológica realizada y la revisión de los trabajos previos existentes mediante una revisión bibliográfica exhaustiva.
- Realizar un estudio comparativo del delta del Danubio en distintas épocas y establecer una evolución del mismo mediante una cartografía geomorfológica comparativa.
- Aplicar los conocimientos aprendidos durante el Grado en Geología y utilizarlos para realizar una hipótesis sobre la evolución del delta.
- Aprender a utilizar la herramienta informática Q-GIS para realizar una cartografía geomorfológica.
- Contrastar los efectos de la gestión medioambiental de recursos y aprovechamiento del río Danubio como principal vía de transporte con los cambios sufridos por el delta.

### **4. Metodología.**

La metodología seguida para la realización de este trabajo se divide en dos partes. La primera es un trabajo de investigación del estado actual del conocimiento mediante una revisión bibliográfica exhaustiva y el estudio de cartografías históricas. Esto se ha realizado mediante una búsqueda en internet de artículos, páginas web y mapas cartográficos antiguos y actuales. Además, se ha contactado con el geólogo al frente del Instituto del Delta del Danubio de Rumanía, Dr. Oliver Livanov, que también ha proporcionado información, como el mapa de suelos que se adjunta en el Anexo III.

En cuanto a la segunda parte de trabajo, se ha realizado una cartografía geomorfológica en la que se observan las principales unidades geomorfológicas, así como los diferentes estadios evolutivos del delta (Anexo I). Para la realización de esta cartografía se ha utilizado la aplicación informática Q-GIS 3.6 para Macintosh. Por otro lado, se ha elaborado un mapa con las unidades geomorfológicas deltaicas actuales (Anexo II). Como base para ambos mapas se han utilizado principalmente tres mapas georreferenciados: Mapa Google Earth actual, mapa de suelos y una imagen de satélite Landsat de 1984 y de 2000 además de los mapas históricos disponibles, compilados en el Anexo IV.

## 5. Área de estudio.

### 5.1. Situación geográfica.

El río Danubio nace en Alemania junto al Rin y se extiende por más de 807.827 km<sup>2</sup> en Europa central y sudoriental. Fluye atravesando diez países europeos hasta desembocar en el Mar Negro, donde su descarga anual llega a los 6486 m<sup>3</sup>/s (Sommerwerk et al., 2009). Se clasifica como el segundo río más grande de Europa, solo detrás del Volga, y el vigesimoprimer del mundo. La desembocadura en el Mar Negro está formada por un edificio deltaico compuesto por tres lóbulos funcionales y en la actualidad que se sitúa en la frontera entre dos países, Rumanía y Ucrania. El lóbulo que se sitúa más al Norte, Chilia, está en territorio Ucrainiano; mientras que los otros dos lóbulos que componen el delta, Sulina y St. George, al sur, se encuentran en Rumanía. El régimen natural del río varía estacionalmente con unas precipitaciones anuales de 500 mm en la zona del delta. (Habersack et al., 2016).



Figura 3. Imagen del recorrido del Danubio por Europa. Fuente: <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Bassin-du-Danube.png>

En el delta encontramos más de 668 lagos relacionados con los deltas antiguos y el drenaje de los canales actuales en situaciones de crecida. La existencia de estos lagos ayuda a que el delta tenga un ambiente hidrogeológico muy importante. La mayor parte del delta se utiliza para agricultura y piscicultura.

Climáticamente hablando, el delta se encuentra en una zona con clima continental-templado con gran influencia marina. La temperatura media anual es de 11,3°C, con unas máximas de 22,6°C, y una humedad del 80%. La tasa de precipitación anual es de 400 mm, alcanzando los 690 mm. (Institute for Soil Science and Agrochemistry of Bucharest, 1996).

## 5.2. Situación geológica.

La geología del delta del Danubio es compleja y su estudio se centra principalmente en el análisis de los tipos de suelo o en la biodiversidad e interés ecológico de algunas áreas donde el aprovechamiento tanto agrícola como ganadero o pesquero es fundamental para el desarrollo de la población local. Se trata de formaciones muy recientes, cuaternarias, holocenas en su mayoría ligadas a la evolución del sistema deltaico (Fig. 4). El mapa de suelos a escala 1:100000 del Institute for Soil Science and Agrochemistry of Bucharest (1996) (Anexo III) constituye una buena herramienta para inferir la geología de la zona.

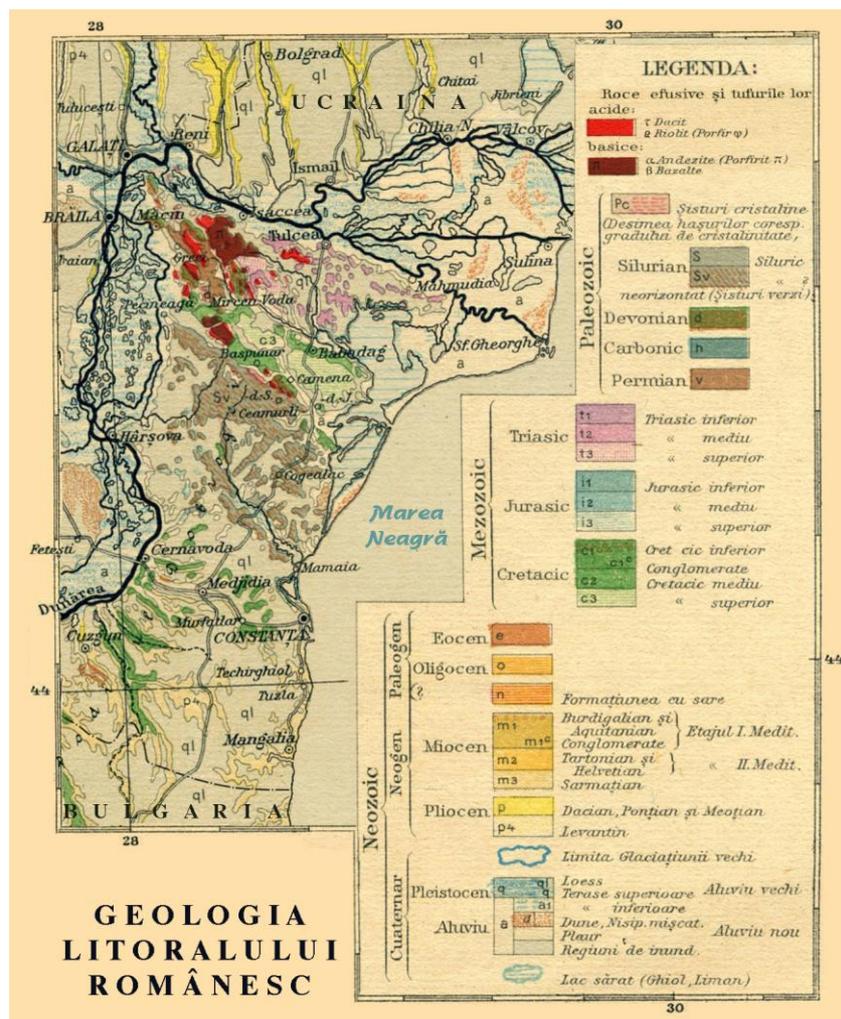


Figura 4. Mapa litológica de las principales unidades geológicas del sector rumano de la cuenca del Danubio.

Los depósitos que encontramos en el delta son cuaternarios en su gran mayoría, solo hay una evidencia de los ciclos pre-cuaternarios en la zona donde se produce la primera bifurcación del río y se convierte en dos canales (la parte este del mapa del Anexo I) anteriormente invadida por el mar, con ciclos deposicionales de carbonatos de plataforma. El delta comenzó a formarse en el Cuaternario, lo que se evidencia en su geología (Anexo III) que está en su mayoría compuesta por depósitos detríticos de potencias de hasta 300-400 metros. La geología del delta está estructurada en tres grandes etapas de depósito asociadas a tres tipos de facies.

- Depósitos de ambientes marinos-litorales: Estos depósitos los encontramos en la parte más próxima al mar de la llanura deltaica. Son depósitos de playas fósiles y actuales acumuladas. Hay dos tipos, depósitos formados por la deriva litoral y depósitos formados por la dinámica fluvial. Los primeros son arenas cuarzo silicatadas que contienen óxidos de hierro y minerales resistentes al transporte, como granate, ilmenita o turmalina. En cuanto a los depositados por el río en la zona de la desembocadura tienen anfíboles, ilmenita y epidota.
- Depósitos de ambientes lacustres: Se encuentran en la zona media de la llanura deltaica, donde se sitúan la mayoría de los numerosos lagos y zonas endorreicas. Son arenas lacustres con alto contenido en sílice y mineralogías anfíboles, epidota e ilmenita. En estos depósitos además, se encuentran las evidencias del asentamiento neolítico.
- Depósitos de ambiente fluvial: Depósitos de areniscas de grano fino con sílice, granates y epidota. Presentan distintas estructuras como depósitos de carga, diques naturales subacuáticos o aéreos o depósitos de decantación. Hay un tránsito entre los depósitos lacustres y fluviales, no son contactos netos, dependiendo de la carga de los canales conectados a los lagos.

## **6. Resultados y Discusión.**

### **6.1. Delta actual.**

El delta del Danubio es una de las zonas más explotadas del río, los principales cambios que ha sufrido por su explotación se deben a la regulación de algunos canales mediante obras de canalización artificial que han tenido como consecuencia una modificación neta en los aportes tanto de caudal como de sedimentos. Junto a los trabajos de ingeniería para realizar estas canalizaciones, encontramos una central hidroeléctrica en la desembocadura del Sulina y una central nuclear que se abastece del St. George, Cernavoda. La modificación del cauce no solo ha ocurrido en el delta, sino que se han sucedido a lo largo de todo su cauce. Por ejemplo en la ciudad de Viena se establecieron una serie de esclusas para facilitar su navegabilidad y la creación de un canal artificial, reduciendo el aporte de sedimentos, lo que termina afectando al delta. Por todo ello, y como medida de preservación tanto de la biodiversidad como por tratarse de un entorno de incalculable valor ecológico, fue se declarado Reserva de la Biosfera, Patrimonio Natural de la Humanidad en 1991.

El Danubio se acerca a la costa del Mar Negro con un solo cauce, caudaloso y navegable. Cuando llega a unos 100 km de la costa, en una pequeña localidad con una zona natural llamada Pătlăgeanca (Princesa Ileana), el río sufre una primera bifurcación y se divide en los dos canales Chilia, que continúa hacia el norte, siendo la frontera de Ucrania y Rumanía, y Tulcea, que continúa hacia el este. El canal Tulcea, después de recorrer 40 km, sufre una segunda bifurcación, y se divide en el canal Sulina y el canal St. George. Así se forman los tres canales que posteriormente desembocan en el Mar Negro (Fig. 5). Estas bifurcaciones también tienen su importancia histórica a la hora de hablar del delta, ya que fueron las antiguas desembocaduras

del río en el Pleistoceno tardío y Holoceno temprano, y se fue formando, por acreción, las zonas más cercanas a la costa, hasta obtener la situación actual.



Figura 5. Distribución espacial de los tres canales principales: Chilia, Sulina y St. George.

En el delta hay una modificación sustancial en su forma. Entre los tres brazos, se estima una tasa actual de progradación de unos 40 m al año. Cada brazo tiene su propia progradación con diferentes tasas de acreción. Esto lo condiciona que el Chilia lleva el 58% de la distribución, el Sulina el 19% y el St. George el 23%. Además de la dinámica litoral y fluvial se ha evidenciado que la evolución y acreción de los lóbulos deltaicos están controlados por la presencia de una falla, la falla Sfantu Georghe con dirección NNE-SSW que controla la forma de la línea de costa en el área del delta. (Popescu et al., 2016).

El delta, además, tiene una gran importancia geológica, no solo por sus modificaciones en los últimos tiempos, sino también por su morfología actual. Esta morfología es tan compleja que no podríamos clasificarlo como un solo tipo de delta. Lo primero que llama la atención son las canalizaciones naturales en la llanura deltaica, las artificiales también apoyan esta hipótesis, que podrían indicar que se trata de un delta influido por el río. Sin embargo, cuando observamos la zona más próxima a la desembocadura, las zonas del frente deltaico y el prodelta, se observa su forma triangular, lo que es característico de un delta dominado por el oleaje. Al observar con más detenimiento, se observa como la forma triangular está más redondeada y se asemeja a una forma lobular. Por lo tanto podríamos concluir que el delta del Danubio es una combinación de delta dominado por el río y delta dominado por el oleaje. Además, cabe destacar que es un delta constructivo, existe una progradación general de la línea de costa. Este delta consta de tres unidades deposicionales: la llanura deltaica, el frente deltaico y el prodelta. (Anexo II).

No obstante, este delta se puede subdividir en tres deltas distintos, ya que sus tres brazos forman cada uno un tipo de delta. El canal Chilia, que es el que está situado más al norte, y supone la frontera entre Ucrania y Rumanía, está marcado por la influencia de la corriente de deriva litoral hacia el sur que modifica la dirección de deposición de un delta del tipo dominado por el oleaje. El siguiente canal hacia el sur es el Sulina, consta de dos secciones: en el norte encontramos una bahía, Musura Bay, situada entre el Sulina y la parte sur del Chilia; y en la parte sur hay una

playa que recorre 12 km. Por tanto, el Sulina formaría un delta mixto, dominado por el río, en su parte norte, y por el oleaje, en el sur. El canal St. George representa el brazo más al sur del delta, destaca por la isla barrera, Sacalin, y el lagoon asociado que encontramos en el sur, lo que apoyaría la deriva por oleaje que sufre el delta del Danubio y por tanto también el delta del St. George.

Geomorfológicamente hablando, si observamos la costa además de la playa dominada por la migración de las dunas hacia la dirección de la deriva litoral hacia el sur. Observamos flechas litorales, lo que nos indica que la deriva es menor de 40°, y el depósito de los sedimentos se hace acorde a esta deriva. También hemos hablado de la isla barrera y el lagoon que encontramos en el delta del canal St. George; isla barrera cuya dirección va acorde a la deriva. La bahía del canal Sulina también tiene su importancia geomorfológica, ya que es consecuencia y evidencia de que es un delta mixto con una dominación por el río, y no solo por el oleaje como indican las otras morfologías de la costa.

Otra característica fundamental es la presencia de numerosas zonas lacustres y/o encharcadas. Se observan numerosos lagos, 668 en el año 1980, un 9,28% del delta. Llama la atención que los lagos de la parte norte del delta tienen una orientación a favor del curso del río, mientras que los del sur presentan una orientación mayoritaria a favor de los depósitos de acreción, lo que se podría deber a restos del lagoon que formaron esas barras y que se quedó encerrado cuando la barra se cerró y se formó un lago. Institute for Soil Science and Agrochemistry of Bucharest, 1996.

## **6.2. Análisis geomorfológico y evidencias evolutivas.**

El análisis geomorfológico y evolutivo se ha realizado basándose en el mapa geomorfológico realizado con Q-GIS (Anexo I). La interpretación realizada difiere en algún punto en la evolución del delta con la encontrada en la revisión bibliográfica, y que se comentará en las conclusiones.

Para explicar la evolución del delta establecemos 5 épocas de depósito principales, desde el Pre-Cuaternario hasta la actualidad (Fig. 7).

### -> Etapa 1: Formación de los primeros depósitos.

La primera época del delta va desde la formación de la bifurcación principal hasta el final del depósito de los lóbulos Chilia I y el Tulcea. La morfología de la disposición espacial de los depósitos tiene una semejanza con la primera cartografía del delta, realizada por Herodoto (Fig.1). Tanto dentro del propio Chilia I como en el Tulcea, con la segunda bifurcación de los canales principales Sulina y St. George, hay evidencias morfológicas de que se trataba de un estuario con numerosas canalizaciones y no un delta, como el actual. Se observan las antiguas llanuras fangosas de estuario, sub-llanuras mareales separadas por canalizaciones dentro de la llanura mareal (Fig. 6).



Figura 6. Ejemplo de llanura fangosa de estuario, llanura de marea de estuario. Fuente <http://terra.geociencias.unam.m>

-> Etapa 2: Relleno del estuario.

Comienzan una serie de ciclos de trasgresión marina durante el Pre-Cuaternario, se produce una progradación de las facies del estuario formado en la época anterior hacia el Mar Negro. En esta época se forman cantidad de lagos asociados a las canalizaciones del estuario, que posteriormente quedan aislados y forman las actuales facies lacustres.

-> Etapa 3: Falla Sfantu Georghe.

Esta etapa es muy importante en la evolución del delta del Danubio, ya que es el paso de estuario a delta. Se produce un hundimiento de la plataforma somera de llanura fangosa de estuario, que hace que la parte de estuario desaparezca. Esto conlleva que desaparezcan la mayoría de las canalizaciones y se aíslen los lagos interiores.

Este hundimiento produce una falla normal, la falla Sfantu Georghe, de la que hay muy pocas evidencias bibliográficas, que condicionará los próximos depósitos y supone el final de la tercera etapa.

-> Etapa 4: Nuevo edificio deltaico.

A partir de la falla formada en la etapa anterior, Sfantu Georghe, comienza a formarse un nuevo edificio deltaico. Esta etapa coincide con la época de mayor actividad del canal Sulina, lo que hace que los depósitos del nuevo edificio deltaico se formen en este canal.

El nuevo lóbulo deltaico se construye mediante barras de acreción por los sedimentos que lleva el canal Sulina, y que se depositan a favor de la falla. Estos depósitos se frenan cuando el canal Sulina disminuye su actividad a favor del canal St. George, que toma el relevo. Las canalizaciones artificiales del Sulina y que suponen el abandono de sus dos meandros

principales, se realizaron para evitar que este canal fuera abandonado porque la mayoría de su carga fue captada por el canal St. George, y así asegurar su navegabilidad y aprovechamiento.

-> Etapa 5: Canal St. George.

Con la activación del canal St. George, se presenta una construcción de un segundo edificio deltaico y el cierre definitivo de un lagoon asociado al sur, y que ya ha sido ligeramente construido en las tres etapas anteriores. Presenta unidades de acreción que se depositan a favor de las corrientes del canal principal y de las canalizaciones secundarias. Estos depósitos de acreción representan distintas sub-etapas de depósito en las que se formaba una barra con un lagoon asociado y esta se cerraba hacia la línea de costa por la deriva litoral y los depósitos del canal, dejando en ocasiones el lagoon encerrado que actualmente es un lago interior. Su depósito también está condicionado en la primera época de la etapa, por la falla Sfantu Georghie.

-> Etapa 6: Formación delta actual.

En la actualidad el canal Chilia ha sustituido al canal St. George como el canal principal de más carga, esto conlleva que la construcción del tercer edificio deltaico se realiza en este canal. Este canal alimenta el lagoon que tiene al norte y los lagos interiores formados en la época de estuario. Además también se ha formado en esta etapa una nueva barra de acreción con su lagoon asociado en el St. George por la deriva litoral y la línea de costa de los lagoons inferiores.

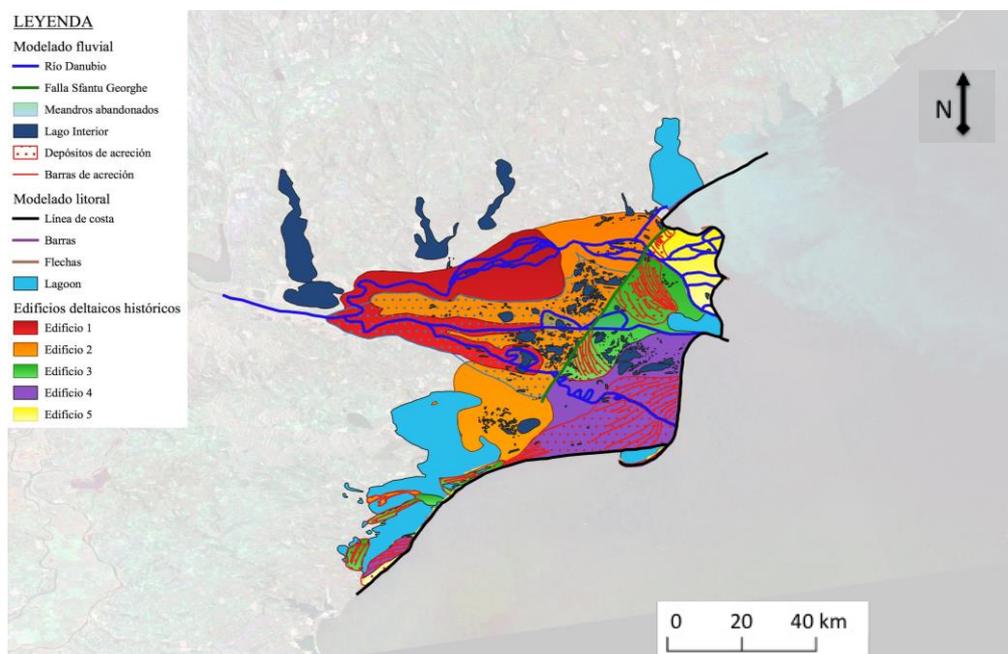


Figura 7. Imagen del mapa geomorfológico realizado en el que se observan las distintas etapas. 1- Edificio 1: primera etapa, formación de los primeros depósitos. 2- Edificio 2: segunda etapa, relleno de estuario. 3- Falla Sfantu Georghie. 4- Edificio 3: cuarta etapa, nuevo edificio deltaico. 5- Edificio 4: quinta etapa, canal St. George. 6- Edificio 5: sexta etapa, formación delta actual.

La formación de las tres últimas etapas, los tres edificios deltaicos, coinciden con las modificaciones antrópicas del delta por canalizaciones y desvíos del trazado. Por tanto, es cierto que si que hay una evidencia de acción antrópica sobre el delta, que ha modificado su

naturaleza. Se podría imaginar que si no se hubiera realizado la canalización artificial del Sulina en la cuarta etapa, podría haber llegado a ser completamente abandonado y su depósito habría sido distinto. También se observa de manera clara la deriva litoral, sobretudo en la zona de las barras de acreción del canal St. George.

### 6.3. Evolución del delta.

#### 6.3.1 Causas principales de los cambios.

La compleja evolución del delta del Danubio tiene tres causas principales, que combinadas todas ellas hacen del delta una localización geológica única. Dos de estas causas son de origen geológico, el levantamiento de los Montes Cárpatos y la acción del Mar Negro sobre la costa. El tercer elemento que condiciona la evolución del delta es la acción antrópica, esta causa en los últimos años posiblemente sea la más importante, ya que los cambios son mucho más rápidos que los provocados por las causas geológicas.

#### ->Levantamiento de los Montes Cárpatos:

Los Montes Cárpatos son un sistema montañoso geológicamente joven que se erigen al este de los Alpes, mayormente dentro de las fronteras de Rumanía y Eslovaquia (Fig.8). Se formaron durante la Orogenia Alpina en el Paleógeno tardío – Mioceno temprano (Argyriadis, 2016). Su situación geográfica ha sido clave en la historia, ya que sirvió de defensa para distintas civilizaciones como el Imperio Austrohúngaro o el Imperio Romano. También es clave para la evolución del delta del Danubio pues su levantamiento durante la orogenia Alpina condiciona el trazado desviándolo hacia el sur y forzándolo a dibujar un arco hacia el sur en su tramo medio para luego girar hacia el norte y acabar desembocando junto a la frontera de Ucrania en el Mar Negro.

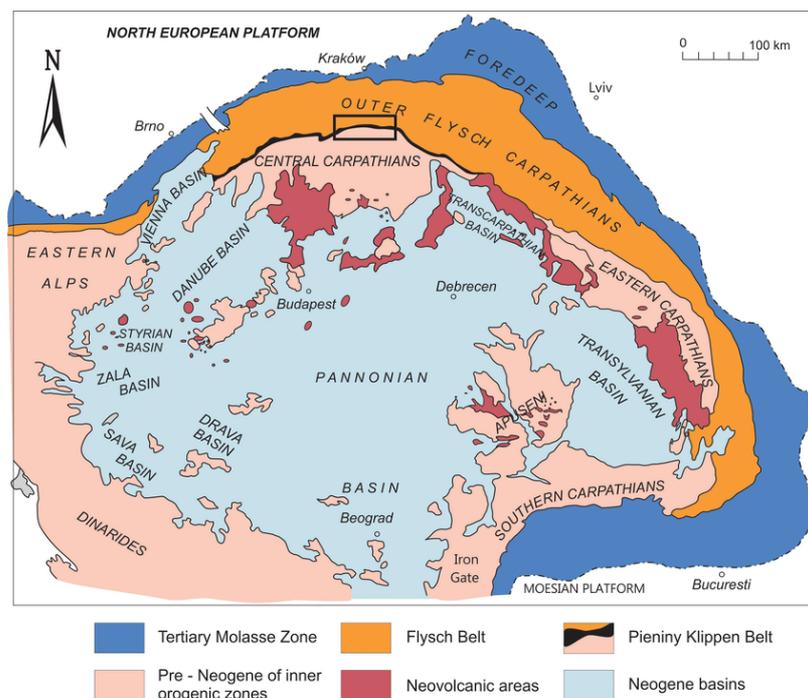


Figura 8. Cartografía Montes Cárpatos. The North European Platform suture zone in Poland. Golonka, J. Et. al. 2018.

Los Montes Cárpatos es un sistema montañoso que no tiene mucha altura. Esta altura hace que las características sean distintos a los Alpes, aunque se formaran a la vez. Son montes sin nieve constante, solo en épocas de frío y en los que no se conserva ninguna evidencia de la posible presencia durante las glaciaciones cuaternarias de glaciares en ellos. Aunque se les caracterice como sistema montañoso, realmente son pequeños sistemas agrupados, pero no conectados directamente.

Al levantarse los Cárpatos formaron un semicírculo con orientación NE que cierra el Danubio por el SW. Comienzan y terminan en el Danubio, mientras este describe un arco hacia el sur. Cuando el Danubio supera los Cárpatos, vuelve a girar hacia el norte (Vigiak et al., 2016) esto indica que la modificación el trazado del Danubio por la formación de esos Montes es clara. En el sur, cuando el Danubio atraviesa el final de los Montes Cárpatos forma un lugar de gran interés histórico y geológico, las Puertas de Hierro. Este nombre se le da a un cañón natural que se ha originado por el paso del Danubio y que separa los Montes Cárpatos de los Balcanes, y supone la frontera entre Rumanía y Serbia. Cuando el río atraviesa las Puertas de Hierro, arrastra consigo gran cantidad de materiales mientras va modelando el cañón. Este paso que antiguamente era un lugar con grandes corrientes y estrechamientos en la garganta provocado por el paso del río, se ha modificado y se han construido presas que lo han hecho más ancho y navegable, pero que hace que llegue menos cantidad de flujo y sedimentos al Mar (Habersack, 2016).

#### -> Acción del Mar Negro en la línea de costa:

Cuando el Danubio ya ha realizado todo su recorrido por todo el Sistema Central europeo, llega al Mar Negro. Allí el río forma un delta de morfología compleja y condicionada por las modificaciones geológicas y antrópicas actuales e históricas. Esta morfología deltaica está estrechamente condicionada por la acción del Mar Negro. A pesar de tratarse de un mar con una dinámica de olas y mareas pequeña, es posible observar a lo largo de toda la costa evidencias de deriva que forman barras, fechas litorales y lagoons.

Cuando las olas llegan oblicuas a la costa rectilínea y en un ángulo inferior a 10°, se produce una corriente paralela al litoral, entre la zona de rompiente y la orilla, eso es lo que se conoce como deriva litoral. Si se junta con el sedimento que llega a través de desembocaduras o erosión, produce unas morfologías específicas en la línea de costa (Cooper et al., 2007). En el Delta del Danubio, la efectividad de esta corriente es alta, ya que se observan en algunos puntos, como al sur del delta, lagoons con evidencias de varias etapas de formación mediante la generación de diferentes cordones litorales en el interior del lagoon actual (Romanescu, 2013).

La corriente marina del Mar Negro es una corriente circular, con una parte paralela a la costa meridional en sentido W-E y otra parte paralela a la costa norte en el sentido inverso. El sentido descrito se debe al movimiento de rotación terrestre y no a la dirección del viento, que generalmente tiene dirección SE-NW; por tanto, se confirma que el Mar Negro es un mar con una dinámica de olas pequeña (no le afecta en gran medida el viento) y con corrientes establecidas que influyen en la costa (Munteanu, 1996). La corriente marina, en la zona donde se localiza el Delta del Danubio, tiene una dirección hacia el sur-suroeste, por eso las morfologías geológicas inducidas por esta corriente son mas notables en el canal sur (Fig. 9). Esta corriente hacia el sur desvía el flujo de agua y sedimentos provenientes del Danubio que

desemboca a través de los canales del delta, y se depositan a favor de la dirección de la corriente formando morfologías importantes.

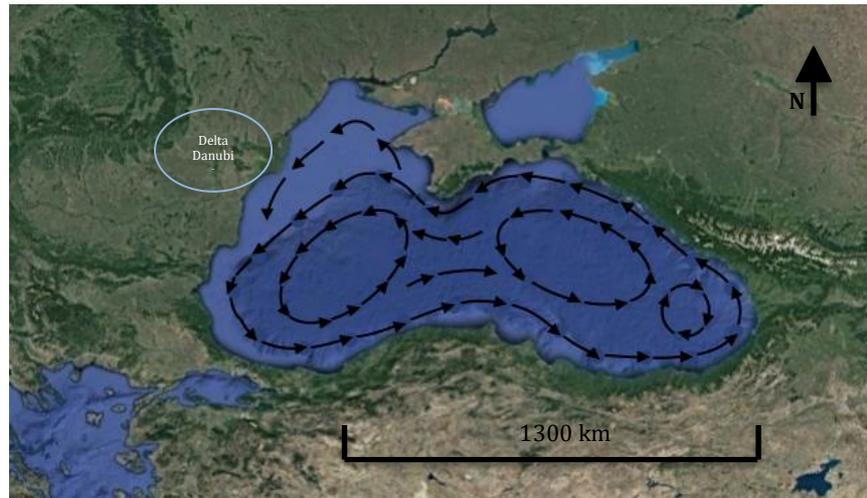


Figura 9. Dirección y sentido de las corrientes marinas más comunes del Mar Negro.

Entre las morfologías asociadas a la corriente de deriva litoral y la desembocadura del río, encontramos barras a lo largo de toda la línea de costa del delta, son más evidentes en la desembocadura del Sulina, que lleva asociada una bahía sobre ella, Musura Bay, esto se debe a que el avance de la barra de 8,7 km hacia la costa y con una dirección SE, provoca que el agua que entra por el norte de esta haya erosionado la costa provocando esta bahía (Stanica et al., 2007). En el caso del canal Chilia, ocurre algo parecido, hay pequeñas calas entre las desembocaduras de los diferentes canales secundarios, separadas por la progradación provocada por los sedimentos que se depositan justo a la salida del flujo en el delta. Además el canal secundario del Chilia también condiciona la bahía Musura Bay, cerrándola por el norte con una flecha de 3,6 km.

El canal St. George también presenta una barra al sur, esta barra por su tamaño, 16 km, y morfología se considera una isla-barrera, y lleva asociado un lagoon interior con unos 6 km de ancho paralelo a la costa. Se ha llegado a formar por la combinación, antes mencionada, de los sedimentos que llegan del delta de este canal y de los otros dos que se sitúan más al norte (Chilia y Sulina) y que han llegado gracias a la deriva litoral hacia el sur. El lagoon que lleva asociado forma una playa dentro de la isla barrera que se va cerrando, hasta que los sedimentos de la isla barrera alcancen la línea de costa. Es una evolución que ha ocurrido durante el Cuaternario, ya que los depósitos de esta época presentan una morfología de barras de acreción que evidencian las distintas barras que se han formado y han ido cerrando lagoons (Giossan et al., 2012).

Por último, el delta también presenta flechas en la costa asociadas a los puntos de desembocadura, en el contacto entre agua fluvial y marina. Estas flechas se crean gracias a las corrientes que se forman por la mezcla de aguas y los sedimentos que arrastran. Si se dan las condiciones de sedimentación adecuadas, aumenta la sedimentación hacia la costa y con predominio hacia una dirección, pueden evolucionar a barras.

### -> Acción Antrópica:

La acción antrópica es la única de las tres principales causas de modificación del delta que no es de origen geológico. No obstante, es de gran importancia. Podría decirse que en el último siglo ha sido la causa que más ha influido tanto en el Danubio durante todo su recorrido, como en el delta.

El Danubio desde tiempos históricos ha sido utilizado como vía de transporte fluvial, como recurso, así como fines políticos. Se tiene constancia de que los romanos ya utilizaban el río como abastecimiento y navegación. Conforme evolucionaban las civilizaciones, también se fueron implantando nuevos medios tecnológicos y de desarrollo del río, que hacían que este fuera modificando su caudal, geografía, dinámica y ecología. Estos cambios son notorios especialmente de la zona del delta. Un cambio significativo que ha controlado la evolución del delta ha sido la modificación del trazado original de los principales canales mediante la construcción de canales artificiales lo que ha conllevado una disminución en la tasa de acreción de sedimentos. (Giossan, 2012).

Antiguamente, las modificaciones de origen antrópico que sufría el río eran de carácter de abastecimiento. Pequeños canales que desviaban parte del agua hacia las plantaciones o granjas. Además también servía como agua sanitaria y para su consumo. En las zonas en las que el río era más caudaloso y profundo, se utilizaba para navegar y comercializar, así como para trasportarse a lo largo del recorrido del Danubio. También sirvió como frontera, y lo sigue siendo en determinados puntos.

Cuando llegó la Revolución Industrial, el río se comenzó a utilizar como abastecimiento a fábricas y empresas que ejercían su actividad cerca del cauce. Estas empresas no solo captaban agua del Danubio, sino que vertían agua en él, lo que provocó una contaminación del río que afectó a la fauna desde el inicio del río hasta el delta aguas abajo, que recibe toda la contaminación vertida en el recorrido. Esta situación continúa actualmente, aunque los países que surca el Danubio, han tomado conciencia de ello en mayor o menor medida, y ya hay actuaciones para reducir e incluso hacer desaparecer esta contaminación. Un ejemplo es Alemania, que obliga a sus empresas a recoger el agua del río aguas abajo de donde realiza su vertido. Además la política de aguas de la Unión Europea implica en gran medida varias secciones del Danubio, ya que alguno de los países que atraviesa son miembros de la UE.

El sistema de esclusas instalado en el río al paso de varias ciudades como Viena, hace que el Danubio sea navegable prácticamente en todo su recorrido. Esto ha modificado tanto el cauce del río, como sus tasas de erosión y sus crecidas y avenidas. Un gran ejemplo es la ya nombrada Puertas de Hierro, a los pies de los Montes Cárpatos, allí el flujo del río consigue erosionar de manera importante la garganta que atraviesa, y esos sedimentos se transportan aguas abajo. En contraposición, los diques y esclusas que hay conforme se acerca a la desembocadura, retienen los sedimentos y alteran los flujos del río.

El delta es posiblemente la parte del Danubio que más se ha alterado en los últimos años por esta causa. Como ya se ha nombrado, la contaminación que todavía llega del río afecta en gran medida a la fauna y la flora del delta y del Mar Negro. Esto ha inducido a que se creen programas de protección de la biosfera del delta que se gestionan por los gobiernos de Rumania

y Ucrania. La deforestación es otro gran problema del delta, provoca inestabilidad en el terreno y erosión, que hace que la morfología cambie. (<http://ddni.ro/wps/>)

La canalización artificial que han sufrido los tres canales principales durante los últimos años, hacen que cambien las tasas de acreción. Estas canalizaciones, así como la construcción de un Muelle en la desembocadura del Sulina, provocan un cambio en la morfología deltaica, ya que las corrientes cambian su dirección por los obstáculos artificiales que se encuentran a su paso y los sedimentos que llegan por los canales son menores porque se retienen en las presas artificiales. Las presas tienen dos fines distintos, como centrales hidroeléctricas y para navegación y recreo, junto al muelle. (Stanica et al., 2007).

Además el abandono de los meandros de los canales Sulina y St. George, provoca también una modificación en la carga y la velocidad de flujo del río. También la biodiversidad de esas zonas se ve afectada, ya que ya no llega agua hasta la zona superior del meandro. (Hohensinner et al., 2014).

Por tanto, la acción antrópica ha supuesto en pocos años un cambio muy grande en el Danubio, afectando en mayor medida al delta, ya que es donde finaliza el recorrido.

Otras dos causas, que son de menor importancia, pero también influyen en gran medida a la morfología y evolución deltaica son los aportes del río, condicionados por los factores climáticos como la media de precipitación anual, tasa de evaporación o escorrentía del río. El otro factor es el viento, la cuenca del Mar Negro está marcada por la circulación atmosférica activa, situada entre las rutas de aire continental atlántico y polar, mediterránea y euroasiática. Predominan los vientos del N. (Munteanu, 1996).

### **6.3.2 Evolución morfológica asociada a dichos cambios.**

Actualmente se conocen bastantes datos sobre el delta del Danubio y la evolución que ha sufrido. Como es un río de vital importancia, se han realizado números estudios sobre él. Se han establecido distintas hipótesis sobre esta evolución, algunas más conservadoras que establecen que los cambios del delta se deben principalmente a las causas geológicas y geomorfológicas provocadas por el continuo cambio geológico de la Tierra; y existe otra hipótesis, cada vez más evidente, que a las causas naturales se le suma una causa antrópica que las agrava y modifica.

Los estudios que se han realizado durante años de la geología delta desde el Cuaternario dividen el delta en tres brazos principales, basándose en los actuales, ya que resulta más sencillo de ilustrar y entender el delta si lo dividimos en tres subdeltas más pequeños. Hay que tener en cuenta que por las condiciones que existían en la antigüedad y las primeras cartografías, el delta se asemejaba más a un estuario que a un delta. Para poder explicar el estado actual del conocimiento vamos a hacer esta misma división a partir del Cuaternario.

En el Pre-Cuaternario, la evolución de la cuenca del delta se caracterizó por el límite entre la plataforma europea este y la plataforma orogénica Norte-Dobregea que forman una falla que influye en la dirección del canal St. George. (Patrut et al., 1983), estos ciclos se pueden resumir en: 1- ciclo Premesozoico, 2- ciclo Triásico Inferior, muy potente, 3- ciclo Triásico Medio-Superior, marino transgresivo con carbonatos, 4- ciclo Jurásico, marino transgresivo con

detríticos, 5- ciclo Cretácico inferior, descubre depósitos jurásicos, 6- ciclo Plioceno, descubre depósitos mesozoicos.

Durante el Cuaternario, los distintos subdeltas (Anexo I) llevaron la siguiente evolución:

#### ->Chilia:

Históricamente el Chilia ha pasado por dos fases importantes: el Chilia I y Chilia II, cada uno condicionado por distintos eventos geomorfológicos. No obstante, ambos fueron un lagoon con conexión con el Mar Negro y se cerraron por la acreción de los sedimentos, lo que hizo que se formara el siguiente delta. La presencia de lagos deltaicos, que evolucionan conforme cambian las tasas de acreción, provocan sedimentos de origen lacustre.

El brazo Chilia es el más activo de los tres, en los últimos 300 años se ha convertido en el canal con más carga de sedimento de los tres que componen el Danubio. Esto coincide con la deforestación de la zona que provoca una mayor erosión en la cuenca interior y la reducción de sedimentos en el St. George por avulsión de delta (Filip et al., 2014). Esta carga de sedimentos hace que sea el que mayor crecimiento muestra, con tasas de acreción históricas de 5.9 y 4.5 MT/año.

El Chilia I es el lóbulo más antiguo, está situado en la cuenca Pardina, esta cuenca albergó un lago durante el principio del Cuaternario, en el que confluían dos valles situados al norte y con un lago actualmente en cada valle (Catlabug y Chitai). Este lago del Pleistoceno estaba conectado al Mar Negro, ya que hay evidencias de foraminíferos bentónicos en los sedimentos arcillosos de plataforma que encontramos en la zona en la que se hubiera situado.

La morfología original del Chilia I se puede asimilar al modelo de delta dominado por el río. Múltiples canales secundarios se expandían a lo largo del Chilia I, con un canal central WSW-ENE. Encontramos una zona que no se vio afectada por la canalización secundaria, y que fue importante para el paso del Chilia I al Chilia II, el Chilia Promontory. Esta zona se cerró con la expansión del delta hacia el sur, en las cuencas Martita-Merhei, y estableció el principio del nuevo delta. El lóbulo Chilia I se desarrolló en dos fases, dos ciclos de depósito de sedimentos lacustres de grano fino: un primer ciclo (6250-2600 años aC) en el que el ritmo de sedimentación fue bastante lento (1m/ka), se formó un pequeño proto-Chilia al mismo tiempo que crecía el Tulcea, canal inicial del Sulina y St. George; y un segundo ciclo (1470 aC), en el que el crecimiento fue más rápido (2m/ka) (Carozza et al., 2012).

Según Bhattacharya and Walker, 1992, el lóbulo Chilia II presentaba una morfología deltaica de tipo bahía, dominada por el río. Hubo una ausencia de distribución de canales secundarios, que provocaron una rápida migración E-W. Se formaron diques naturales que se desarrollaron a lo largo del Chilia II. Se sitúa en la cuenca East-Chilia, que estaba confinada. Este delta coincide con la expansión del lóbulo Tulcea hacia la cuenca Matita-Merhei, en el sur, y su posterior división entre los canales actuales Sulina y St. George. La presencia de fauna marina como foraminíferos y bivalvos hace pensar que Chilia II era también un lagoon conectado al Mar Negro. El Chilia II tuvo su auge alrededor del 800 aC (Giosan et al., 2012). Una vez que los sedimentos deltaicos sobrepasaron la cuenca que alberga este lóbulo (East-Chilia), comenzó la distribución del tercer y actual delta hacia el Mar Negro, Chilia III.

Actualmente encontramos el delta Chilia III, que se comenzó a formar sobre 1700 aC (Mikhailova and Levashova, 2001). Son muy significativos los depósitos submarinos deltaicos. El delta está dividido en dos canales principales (Oceacov y Old Stambul) de los que a su vez salen canales secundarios, es un ejemplo de un delta dominado por el río hasta que se supera la llanura deltaica, que se convierte en un delta dominado por el oleaje. No obstante, en el prodelta se observa evidencias de esta dominación del río, como la bahía situada al norte. Se observa una clara desviación de la progradación hacia el sur, que es la dirección de deposición dominante, sobretodo en el canal Old Stambul, que avanza hasta el delta del Sulina. Sin embargo, el Oceacov evidencia una inicial progradación hacia el norte que posteriormente avanza hacia la dirección dominante, hacia el sur. En el último siglo, se observa claramente una erosión producida por el oleaje que provoca la formación islas barrera en la costa, prácticamente hay una por canal secundario.

-> Sulina:

El canal Sulina sitúa en la parte central del delta del Danubio. Es el más afectado por la acción antrópica. En el s. XIX, el brazo Sulina sufrió una gran modificación, se cortaron los meandros que se forman hacia el norte mediante una serie de esclusas para poder reducir la distancia entre el Mar Negro y los puertos del Danubio, y así facilitar la navegabilidad. Esta modificación, llevada a cabo por el ingeniero Sir Charles Hartley y su equipo, hizo que se incrementara la descarga de agua y sedimentos que se distribuyen a lo largo del Sulina.

Todas las modificaciones que ha sufrido este brazo hace que su línea de costa haya retrocedido casi 20 km en 2000 años, con una tasa de retroceso que supera las del resto de la costa de Rumania, 20m/año en el sur del lóbulo Sulina. Esto provoca que en la parte norte del lóbulo haya una acreción muy llamativa, transformando este lóbulo en un lagoon (Stanica et al., 2007).

Según la metodología recogida en Stanica et al., 2007, se puede evidenciar el cambio en el transporte de sedimentos que ha sufrido en este lóbulo. Para ello se apoyan en la herramienta informática SWAN (Simulating WAVes Nearshore), en el National Institute of Meteorology and Hydrology of Romania y en GeoEcoMar Bucharest dónde se encuentran los datos de batimetría. SWAN muestra un estudio sobre el oleaje a partir de los datos climáticos de la zona a estudiar y su batimetría. Los datos climáticos que se utilizan para hallar el cambio del transporte de sedimentos, es decir del viento que es el parámetro climático que más afecta, se han obtenido del National Institute of Meteorology and Hydrology of Romania at Sulina; se realizaron cuatro medidas diarias de la dirección y fuerza del viento entre los años 1991 y 2000. Se obtienen los resultados de la figura 10.

Point	3 m Depth		7 m Depth	
	Kamphuis (m <sup>3</sup> /yr)	CERC (m <sup>3</sup> /yr)	Kamphuis (m <sup>3</sup> /yr)	CERC (m <sup>3</sup> /yr)
1	-100,877	-65,034	-335,263	-201,172
2	-25,735	2,991	-40,769	-13,787
3	161,365	163,156	433,501	364,122

Figura 10. Resultados obtenidos en el estudio realizado para el artículo de Stanica A., Coastal changes at the Sulina mouth of the Danube River as a result of human activities. Se realizan establecen dos escenarios de 3m y 7m de altura de olas, teniendo en cuenta distintas variables según Shore Protection Manual, 1984 y Kamphuis, 2000. Cabe destacar que el transporte obtenido con 7m de profundidad es mayor que con 3m.

En la parte norte, donde encontramos la bahía Musura Bay, los sedimentos transportados hacia el norte por el Sulina se juntan con los que van hacia el sur procedentes del brazo Chilia. La combinación de corrientes con los sedimentos influyen en la formación de Musura Bay, en la frontera entre Ucrania y Rumanía. Durante el segundo periodo del siglo XX, se formó una barra de 3,6 km que cierra la bahía (Stanica et al., 2007). Los ratios de formación de esta barra se han ido incrementando a lo largo de los años; así, en la década de los 80 avanzó 120 metros anuales; durante los 90, 200m/año; y alcanzó los 225 metros anuales entre 1998 y 2002. Actualmente consta de 4,6 km, pero tanto su crecimiento durante la década 2010 ha sido de 1 km. Cuando se construyeron los muelles de la desembocadura del Sulina, se comenzó a formar una segunda flecha en el norte de estos muelles, que actualmente tiene 1,3 km, pero continúa creciendo.

El sur del canal Sulina también muestra cambios importantes, la evolución natural del litoral se ha alterado completamente desde que se construyeron los muelles. Los muelles ejercen un bloqueo de los sedimentos que provienen del norte, lo que relaciona el crecimiento de las barras en Musura Bay y el decrecimiento de la sedimentación al sur del Sulina. Con la aplicación GeoEcoMar, antes nombrada, muestran unos ratios de avance de la línea de costa de 10 m en las dos últimas décadas del siglo XX y la primera del siglo XXI. A partir de la construcción de los muelles, pasa de una clara progradación a un periodo de erosión extensiva con un ratio entre 6 y 8 m al año, llegando a los 11 m anuales. Esto contrasta con la erosión natural de los últimos dos milenios que fue de 3 a 5 metros (Panin, 1976, 1999).

El brazo Sulina sufrió uno de los impactos más representativos sobre el Danubio, este se realizó en el s. XX, es de propósito hidroeléctrico, se construyeron presas a lo largo del río, que hicieron que hubiera un cambio en el litoral del delta. Estas presas interceptaron los sedimentos transportados por el río, en consecuencia, se ha reducido casi a la mitad el depósito anual de estos sedimentos de lo que cabría esperar si no existieran las presas. Se hizo el río navegable, las esclusas a lo largo del río y la construcción de dos muelles. Esto hace que los sedimentos que se transportan desde el norte sean bloqueados y sufran una rápida sedimentación. Ha formado una isla lateral que se ha cerrado y ahora ha formado un lagoon de dos entradas.

El delta que encontramos actualmente en el canal Sulina es el que más evidencia el carácter mixto del delta del Danubio. El propio delta del Sulina es al norte del tipo dominado por el río y al sur dominado por el oleaje. No existen tantos canales secundarios como en los otros dos canales, y los que hay no son de gran importancia, la desembocadura del Sulina es principalmente solo del propio canal Sulina. Esto, además de la gran bahía, Musura Bay, que encontramos en el norte, apoyan la dominancia del río. Sin embargo, al sur encontramos una playa de 12 km. que recorre la costa. La migración de las dunas presenta una deriva litoral hacia el sur que va acorde con la observada en el canal Chilia, lo que evidencia que está dominada por el oleaje del Mar Negro. (Stanica et al., 2007).

-> St. George:

En el sur del delta del Danubio encontramos el canal St. George. Fue el último en formarse. Parte de la división del canal Tulcea en el Sulina y el St. George. Esta división es coetánea a la formación de los lóbulos Chilia I y II. Como ya se ha explicado en el Sulina, se situaba en la cuenca Tulcea al sur y la cuenca Matita-Merhei al sur. En su desembocadura en el Mar Negro forma un delta donde destaca una gran isla barrera (Sacalin) y su lagoon asociado. Esta isla

barrera apoya la deriva litoral, nombrada anteriormente. Estas morfologías de costa evidencian el delta dominado por el oleaje que forma el St. George, y por tanto, el Danubio.

El St. George fue el brazo más activo durante años, hasta que el Chilia cogió el relevo. Actualmente tiene una tasa de acreción muy pequeña o casi nula de 7.5 m/año (Preoteasa et al., 2016).

Como pasa con el canal Sulina, el St. George también ha visto modificada su morfología por la acción antrópica sobre los meandros. Consta de una serie de meandros, donde destacan tres por su tamaño. Estos tres han sido ahogados y se han canalizado para potenciar la navegabilidad del canal, al igual que el Sulina. Esto ha supuesto una modificación en la distribución de los sedimentos y la velocidad del flujo del canal (Ichim and Radoane, 1986; Popa, 1997; Panin, 2003). En un corto periodo de tiempo a finales del s. XX (1980), se produce con más fuerza la alteración del transporte de sedimentos, ya que es cuando se realiza por completo la evolución natural de los meandros, abandonándolos.

Los procesos que ha sufrido de retrogradación y progradación se han estudiado por Preoteasa et al., 2016. En él recogen los datos basados en la Optically Simulated Luminescence (OSL) que combina los datos morfológicos y sedimentarios, que apoyan el estudio de la acumulación de sedimentos y la formación de islas-barrera y lagoons. Además también apoyan su estudio en ortofotos y LiDAR, proporcionados por Danube Data National Institute for Research and Development, que dan una relación espacial del delta en la que se observa perfectamente la morfología del mismo. Lo que más llama la atención es el carácter cíclico de la deposición de sedimentos en el lóbulo deltaico.

En el último siglo, gracias a la construcción de presas y esclusas, así como la consolidación de sedimentos en las orillas del río y la reconducción del río cerrando meandros, hace que haya una reducción de carácter triple de los sedimentos que llegan al delta a través del río. Además esto también se favorece por la regulación del brazo Sulina, lo que redujo el flujo de este canal casi un 7%. Los sedimentos también llegan por la deriva litoral que sufre el delta. Las oscilaciones eustáticas del nivel del mar son más pequeñas que la subsidencia que sufre el delta.

La evolución deltaica se observa en la relación de crestas sedimentarias que resultan en la parte sur del brazo, allí se observan las barras formadas durante los últimos milenios y su evolución hasta la actualidad. Mediante una fórmula empírica se han calculado el ratio de sedimentación y la densidad ( $\text{km}/\text{km}^2$ ) de cada cresta. Cada isla-barrera está delimitada por dos crestas, se han contabilizado 10 (S1-S10), de la más antigua hasta la actual que lleva asociado un lagoon (Fig.11).

Ridgeset	Surface (km <sup>2</sup> )	Volume (km <sup>3</sup> )	Age (year before AD 2012)	Lifespan (year)	Sedimentation rate (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /year)	Ridge density (km/km <sup>2</sup> )
S1	5.72	0.19	2100-1480	620	0.3	10.9
S2	9.24	0.28	1480-1380	100	2.8	5.4
S3	15.43	0.33	1380-1280	100	3.3	4.5
S4	10.31	0.23	1280-1230	50	4.6	1.9
S5	19.97	0.46	1230-1160	70	6.6	1.9
S6	30.61	0.74	1160-1080	80	9.3	1.4
S7	53.12	1.40	1080-880	200	7.0	2.4
S8	48.21	1.33	880-680	200	6.6	0.9
S9	131.19	3.83	680-240	440	8.7	2.7
S10	70.43	0.92		>240		

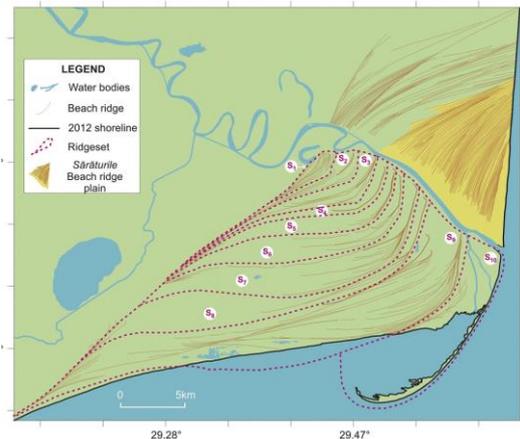


Figura 11. Resultados del estudio de las crestas formadas por islas-barrera que se han plegado a lo largo del tiempo.

La intensa sedimentación que provoca la formación de las isla-barrera se asocia en este caso a la interacción entre las corrientes de la costa, provocadas por la deriva litoral, y las corrientes salientes del canal. Si nos centramos en la deriva, las crestas con menos densidad, son las que más deriva litoral sufrieron, son más extensas en longitud, pero menos anchas, ya que los sedimentos migraban a lo largo de la línea de costa. La primera cresta S1 (hace 2 milenios), se extendió a lo largo de una línea de costa corta y con unas tasas de descarga de 100m/s. Durante las etapas siguientes, S2 y S3, la densidad de las crestas era alta y la longitud seguía siendo pequeña. A medida que la línea de costa aumentaba, es decir aumentaba el frente deltaico, la densidad de la cresta disminuía mientras aumentaba su longitud, S4-S6. Al pasar al segundo milenio dC, continuó esta dinámica de reducción de la densidad de cresta y aumento de la longitud, lo que supone una expansión hacia el sur del delta, y con una morfología irregular. Las crestas pasan de una forma claramente convexa a formas convexas mucho más suaves desde S5 hasta la actualidad. La última cresta, S9, justo la anterior a la actual, es la más extensa con 131 km<sup>2</sup> y su desarrollo fue el más lento, casi 500 años.

La cresta actual (S10) forma una isla-barrera que encierra un lagoon. Su evolución consta de cuatro fases, que suponen el ciclo de formación que ya sufrieron las anteriores crestas.

Primero, en el siglo XVIII se forma una isla-barrera por la sedimentación subacuosa en la plataforma paralela a la línea de costa, todavía por debajo del mar. Esta sedimentación va formando un montículo que aumenta de tamaño conforme recibe más sedimentos. Cuando la sedimentación ha sido suficiente y la altura de la cresta alcanza el nivel del mar, llegamos a la segunda fase de formación.

Durante el principio del siglo XX, esta isla-barrera emerge, con una orientación a favor de la corriente; ya presenta modificación antropogénica al variar los sedimentos que le llegan gracias a las canalizaciones artificiales. Esta isla-barrera recibe el nombre de Sacalin. También en esta fase, se forman unas flechas secundarias asociadas a los sedimentos que siguen llegando y que tienen una dirección favorable a la corriente que los transporta.

En tercer lugar, durante la década de los años 30, la progradación de la costa disminuye, lo que hace que la isla-barrera comience su migración hacia la línea de costa provocada por la corriente. La migración tiene un ratio de 7,5 m/año y es más intensa en el sur de la isla-barrera. No obstante, en la segunda mitad del siglo XX, se produjo el cese completo de la progradación y por tanto una disminución de las tasas de deposición acuáticas, provocó una ausencia de

depocentro de sedimentación de la poca carga que traía el río y un cambio en las corrientes del río que han intensificado la migración.

Por último, todavía estamos en la tercera fase, la isla-barrera terminará de migrar hasta la costa cerrando el lagoon que se encuentra entre ambas y provocando el final del ciclo S10, al que le sucederá un undécimo ciclo.

## 7. Conclusiones.

- Throughout history, the Danube, as well as its delta, has undergone numerous modifications that have altered its morphology. These modifications have three main causes.
- In the formation and evolution of the delta there is a step from estuary to delta that determines its current morphology, and that has not been reflected in the different bibliographic works analyzed. These works refer to the evolution of the delta as the different constructions of successive delta buildings throughout history.
- The coastal drift caused by the Black Sea currents and the lifting of the mountainous system of Alpine origin, the Carpathian Mountains, are the two main natural causes of delta morphology. The coastal drift is more evident since the estuary became delta, because of the contact with the sea is more net and therefore, the coastal drift influences the beach deposits.
- Anthropogenic action is the most important cause of the last centuries, which has conditioned the current delta, by artificially altering the original channel. Currently, in the last 30 years, the delta area has been protected in such a way that the anthropogenic action has diminished, but the consequences of the previous modifications still exist, and the impact of its use is inevitable.
- It is difficult to predict the future of the delta, presently, the most active arm is the Chilia and on which there are several political problems between Romania, which has more protected the delta, and Ukraine, which is to which the Chilia belongs. The coastal drift indeed observed, the growth of accretion bars and navigability will continue shortly, but it is advisable not to abuse the delta or the Danube in general.

## 8. Bibliografía.

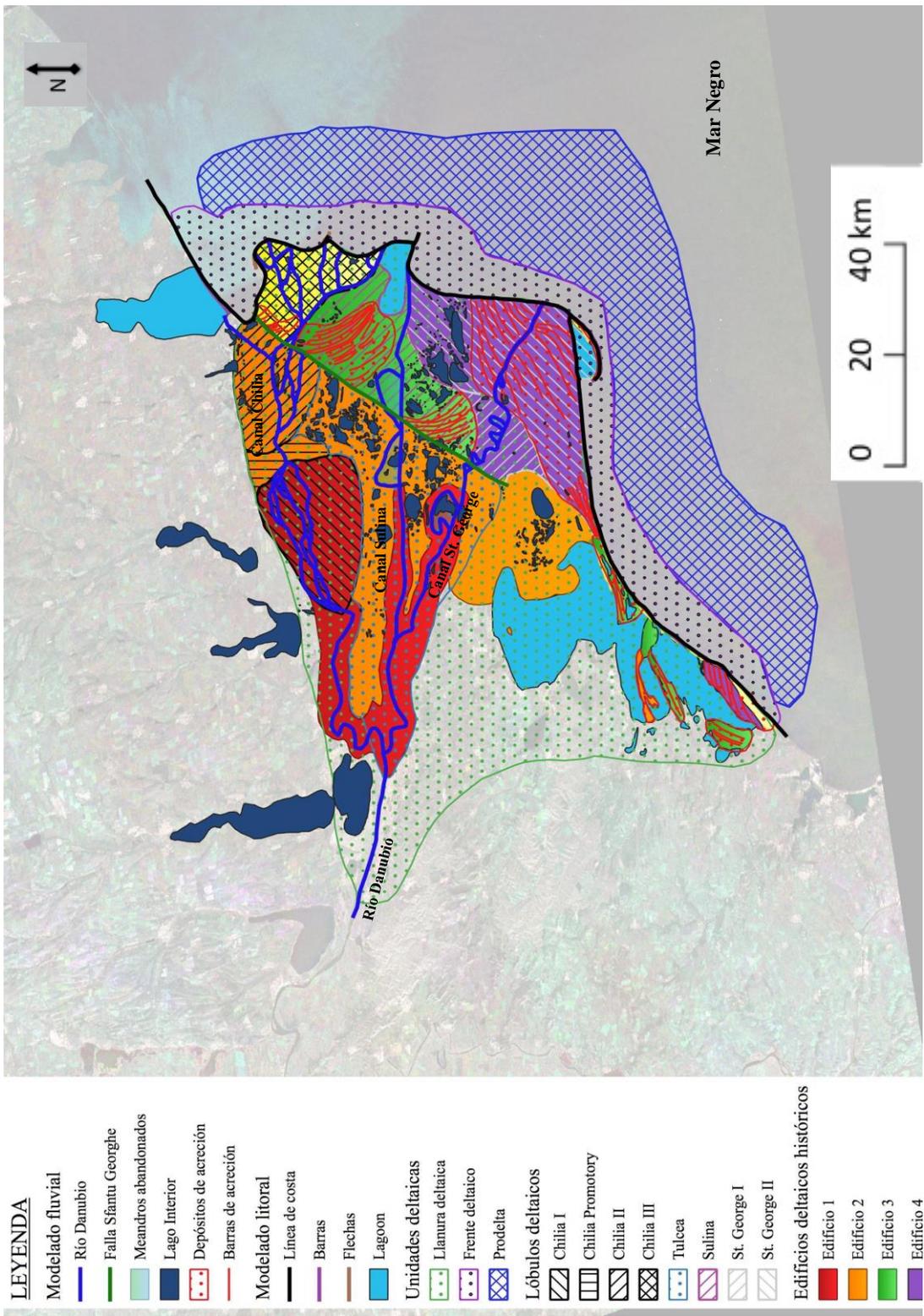
Carozza, J.-M., Radu, V., Levêque Micu, C., Burens, A., Opreanu, G., Haita, C., Danu, M., (2012): Aftermath of the Flooding: Geomorphological Evolution of the Danube Delta after the Black Sea–Mediterranean Reconnection and its Implications on Eneolithic Settlements. *Water Resources and Wetlands*. Conference Proceedings 14–16.

Cooper, A.; Lewis, D.; Pilkey, O. (2007): Fetch-limited barrier islands: Overlooker coastal landforms. *GSA Today*, 17: 3.

Filip, F.; Giosan, L. (2014): Evolution of Chilia lobes of the Danube delta: Reorganization of deltaic processes under cultural pressures. *Anthropocene*, 5: 65 – 70.

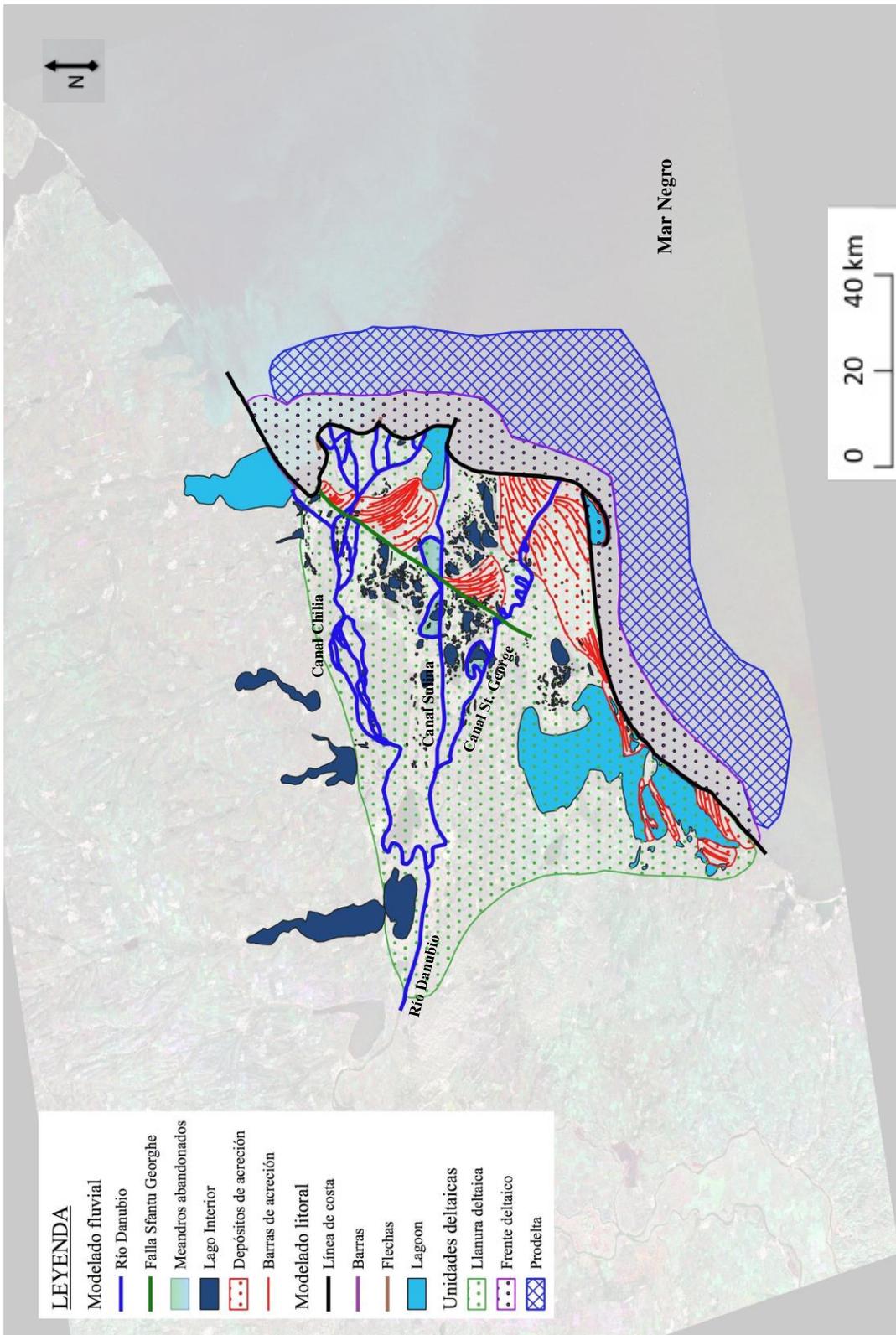
- Giosan, L.; Constantinescu, S.; Filip, F.; Deng, B. (2013): Maintenance of large deltas through channelization: Nature vs. humans in the Danube delta. *Anthropocene*, 1, 35 - 45.
- Habersack, H.; Hein, T.; Stanica, A.; Liska, I.; Mair, R.; Jager, E.; Hauer, C.; Bradley, C. (2016): Challenges of river basin management: Current status of, and prospects for, the River Danube from a river engineering perspective. *Science of the Total Environment*, 543: 828 -845.
- Hohensinner, S.; Jungwirth, M.; Muhar, S.; Schmutz, S. (2014): Importance of multi-dimensional morphodynamics for hábitat evolution: Danube River 1715 – 2006. *Geomorphology*, 215: 3 – 19.
- Institute for Soil Science and Agrochemistry of Bucharest (1996): *SOILS*. Riza, Bucharest.
- Jimenez, J.; Sallenger, A.; Fauver, L. (2007): Sediment transport and barrier island changes during massive overwash events. *www.researchgate.net*: 12p.
- Morellón, M. (2015): The interplay of climate, tectonics and human activities in the evolution of coastal Mediterranean regions: The Holocene record of Butrint Lagoon (Albania). *XIV Reunión Nacional de Cuaternario, Granada*. Comunicaciones: 101 – 105.
- Munteanu, I. (1996): *Soils of the Romanian Danube Delta Biosphere Reserve*. Riza, Bucharest, 174 p.
- Patrut, I. (1983): The geological constitution of the Danube Delta. En: *Association gologique Carpathe-blakanique*, 12.
- Popescu, B.; Micu, M.; Tari, G. (2016): The Moldova Slope and Basin Development in the Ediacaran-Early Paleozoic: A Collage with Multiple Structural Overprints. Adaptado de la presentación oral en: *AAPG European Conference and Exhibition*. Comunicaciones 1: 1 - 31.
- Preoteasa, L.; Vespremeanu-Stroe, A.; Tatui, F.; Zaunescu, F.; Timar-Gabor, A.; Cirdan, I. (2016): The evolution of an asymmetric deltaic lobe (Sf. Gheorghe, Danube) in association with cyclic development of the river mouth bar: Long-term pattern and present adaptations to human-induced sediment depletion. *Geomorphology*, 253, 59-73.
- Romanescu, G. (2013): Geoarchaeology of the ancient and medieval Danube Delta: Modeling environmental and historical changes. A review. *Quaternary International*, 293: 231 – 244.
- Sommerwerk, N., Baumgartner, C., Bloesch, J., Hein, T., Ostojic, A., Paunovic, M., Schneider-Jacoby, M., Siber, R., Tockner, K., (2009): *The Danube River Basin*. *Rivers of Europe*. Academic Press, Oxford, 59–112 p.
- Stanica, A.; Dan, S.; Ungureanu, V.G. (2007): Coastal changes at the Sulina mouth of the Danube River as a result of human activities. *Marine Pollution Bulletin*, 55: 555 -563.
- Tiron, L.; Provansal, M.; Le Coz, J.; Dutu, F. (2014): Contrasted sediment processes and morphological adjustments in three successive cutoff meanders of the Danube delta. *Geomorphology*, 204: 154 -164.
- Vigiak, O.; Malagó, A.; Bouraoui, F.; Grizzetti, B.; Weissteiner, C.; Pastori, M. (2016): Impact of current riparian land on sediment retention in the Danube River Basin. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 8: 30 – 49.

**Anexo I**  
**Mapa geomorfológico actual.**  
**Cartografía geomorfológica completa**



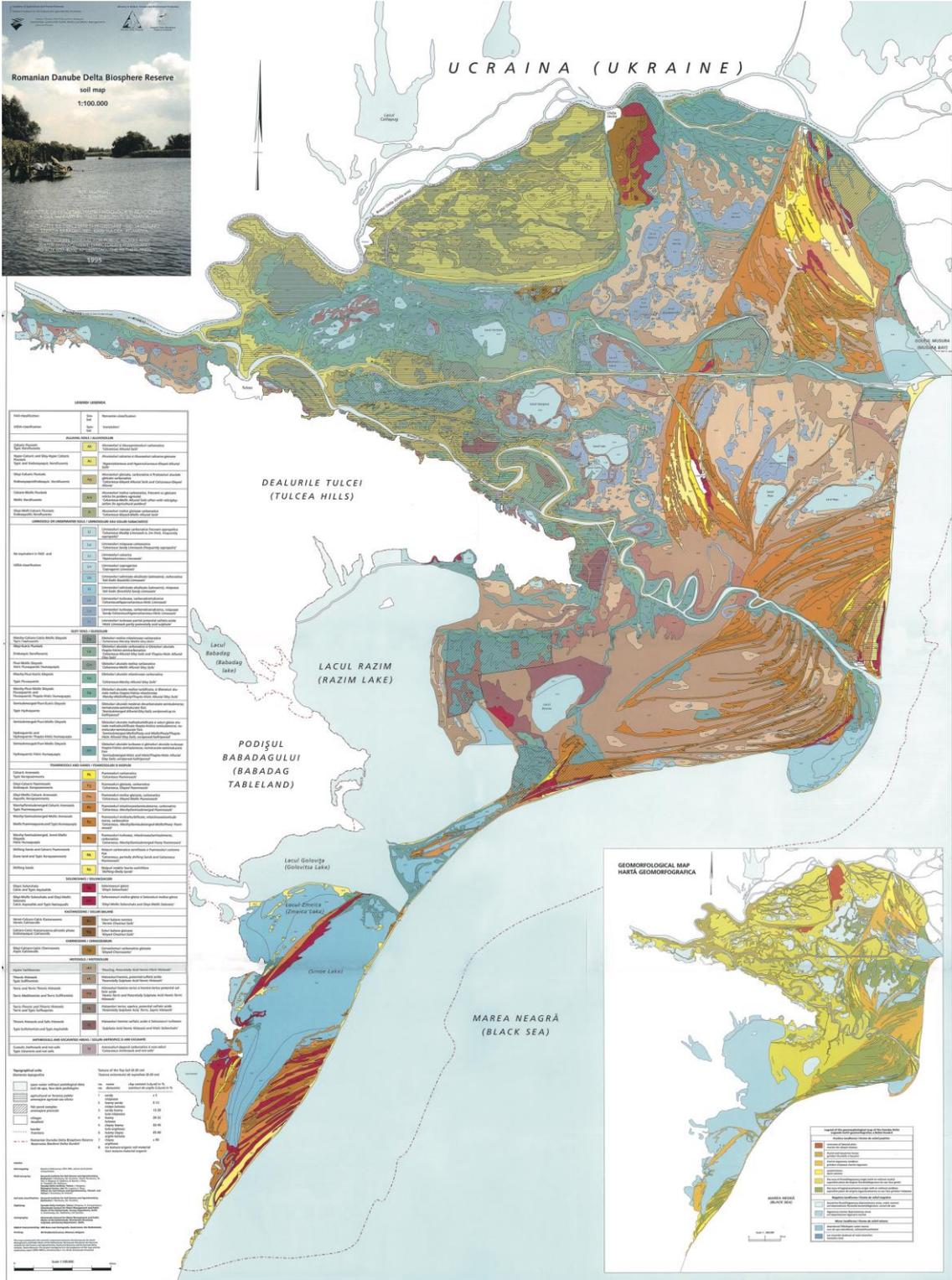
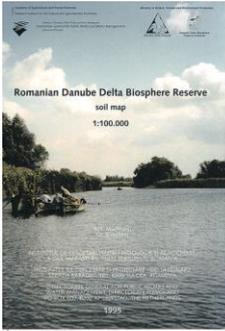
# **Anexo II**

## **Mapa unidades actuales**



## **Anexo III**

### **Mapa de suelos del delta**



# **Anexo IV**

## **Mapas Históricos**

Para la realización de la cartografía geomorfológica así como para su interpretación, han servido de apoyo numerosas cartografías antiguas del delta. En ellas, si se sigue una sucesión temporal, se observan los cambios explicados en el trabajo. Unas de las cartografías más representativas son:

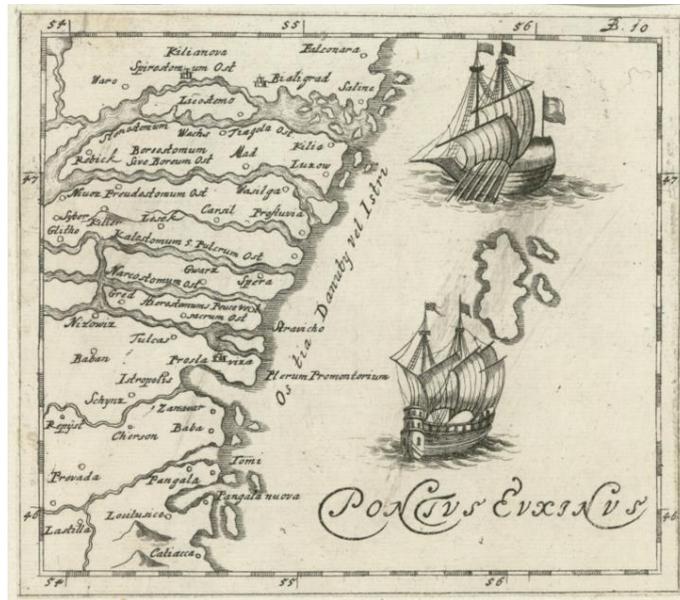


Figura IV.1. Cartografía realizada por Herodoto de de Halicarnaso hace 2500 años.

Fig. IV.1: En esta primera cartografía se refleja el carácter de estuario que presentaba la desembocadura del Danubio hace 2500 años.



Figura IV.2. Cartografía de 1684

Fig. IV.2: Tenemos que esperar más de un milenio para disponer de cartografías más detalladas, como esta de 1684 en la que ya se observa un gran cambio respecto a la de Herodoto, hay una división del delta en dos canales principales. Se observa también el cambio de estuario a delta.



Figura IV.3. Cartografía de 1738.



a)



b)

Figura IV.4: Cartografías de 1771 (a) y 1778 (b).

Entre las figuras IV.3 y IV.4 se observa una evolución en la morfología deltaica, la construcción de un nuevo edificio deltaico en el canal norte, lo que correspondería al Chilia II.

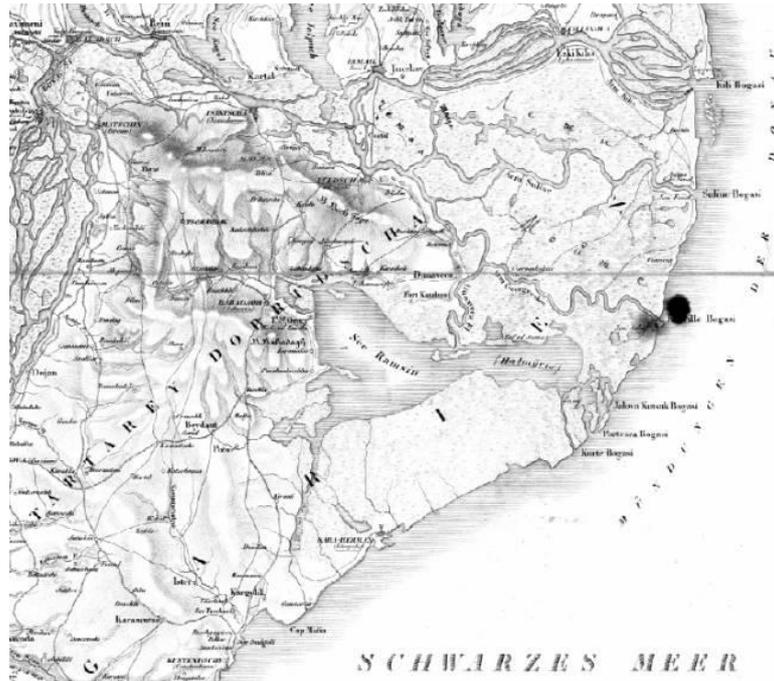


Figura IV.5. Cartografía de 1829.

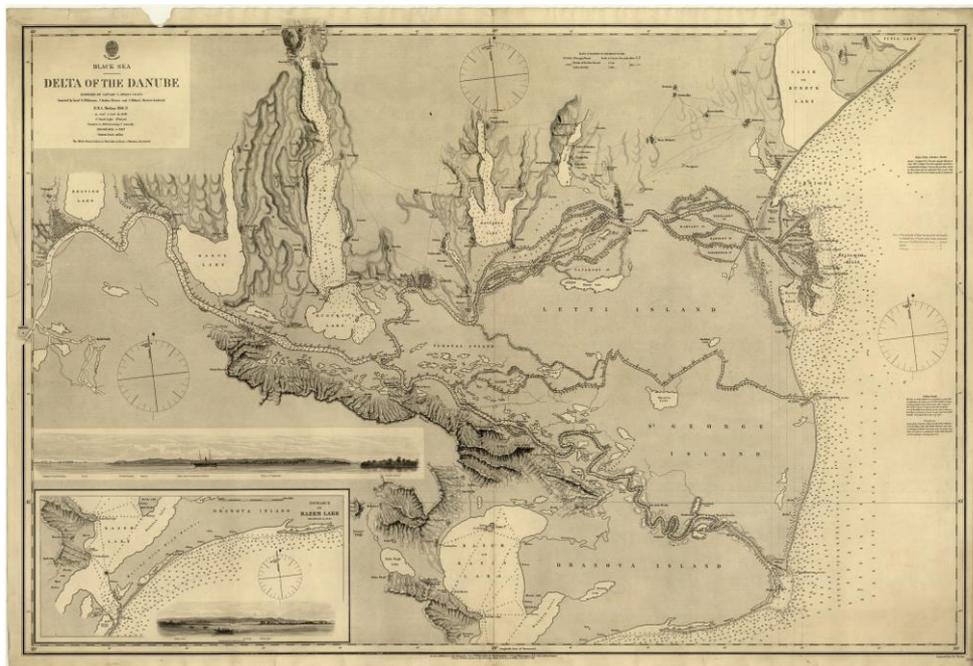


Figura IV.6. Cartografía de 1838.

En ambas cartografías (Fig. IV.5 y Fig.IV.6) se observa el comienzo de la construcción del edificio deltaico actual en el canal norte, Chilia. Lo que correspondería al lóbulo Chilia III.



Figura IV.7. Cartografia de 1867.



Figura IV.8. Cartografia de 1870.

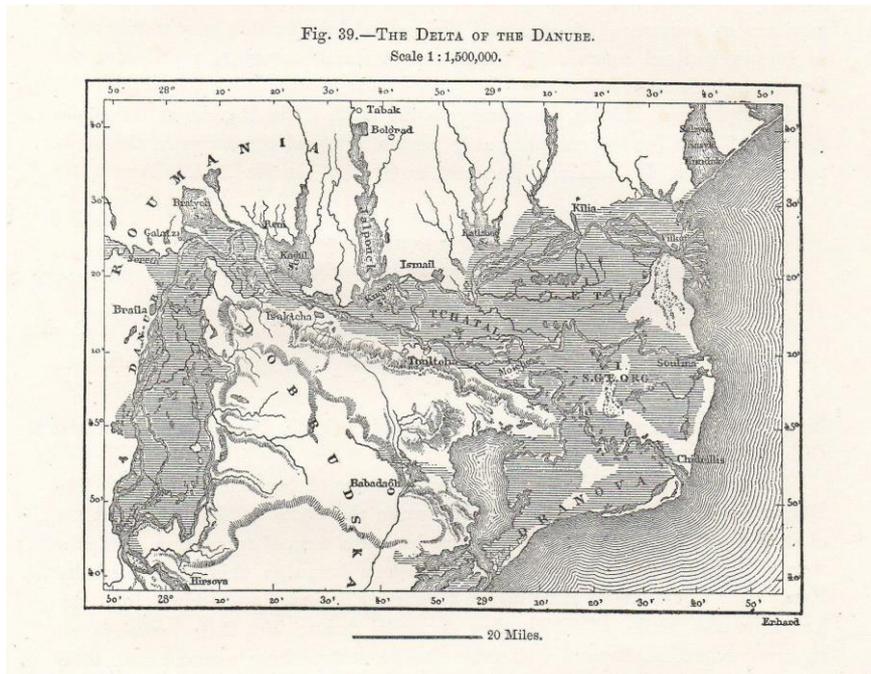


Figura IV.9. Cartografía de 1878.

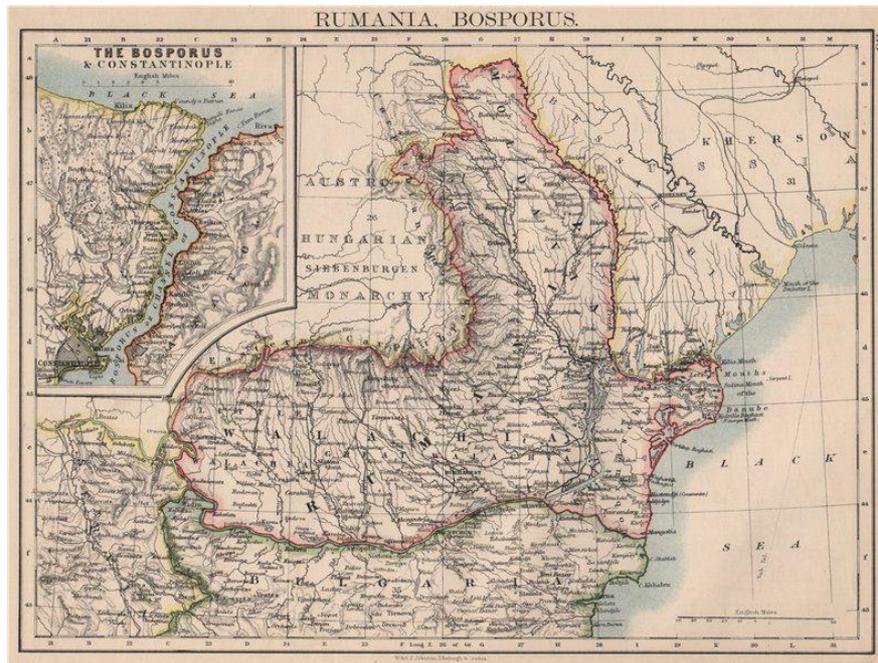


Figura IV.10. Cartografía de 1895.

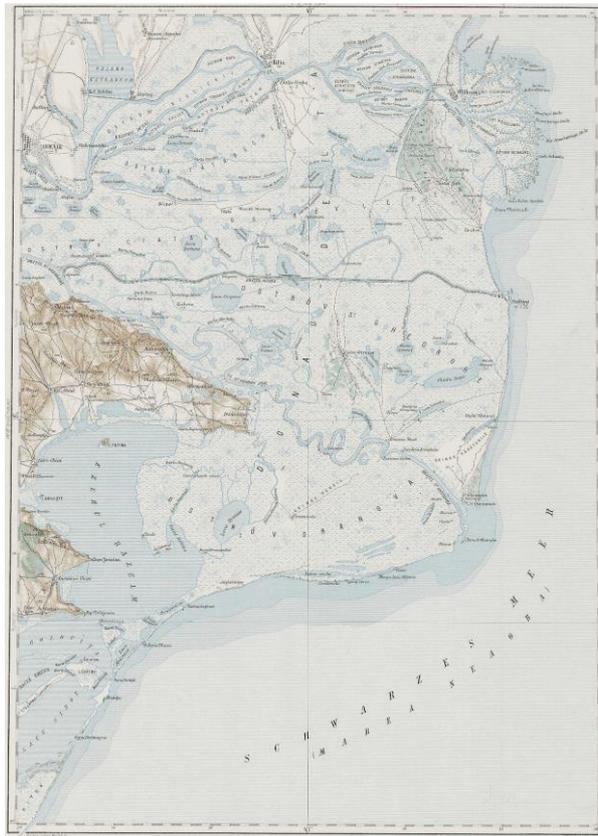


Figura IV.11. Cartografía de 1911.

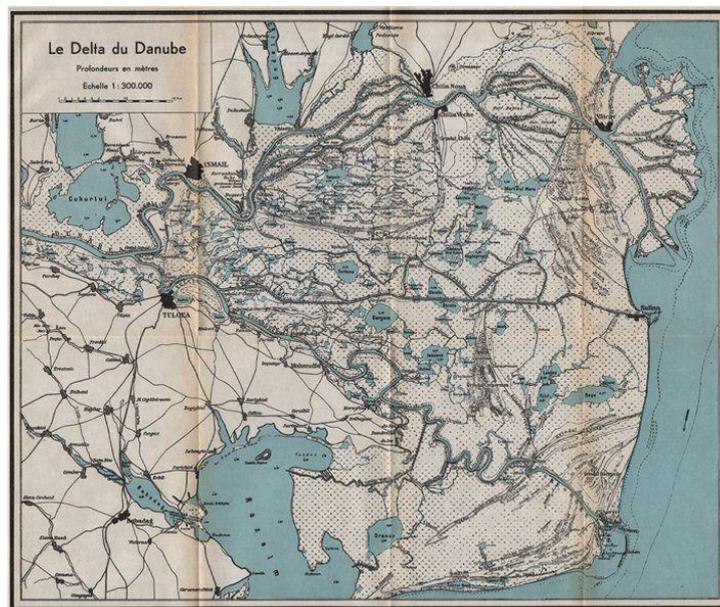


Figura IV.12. Cartografía de 1938.

Después de la secuencia de construcción del actual edificio deltaico observado durante el siglo XIX, en la primera cartografía del siglo XX (Fig. IV.11) ya se observan las canalizaciones artificiales del canal Sulina. Poco después, (Fig.IV.12), se realizan las canalizaciones del canal St. George.

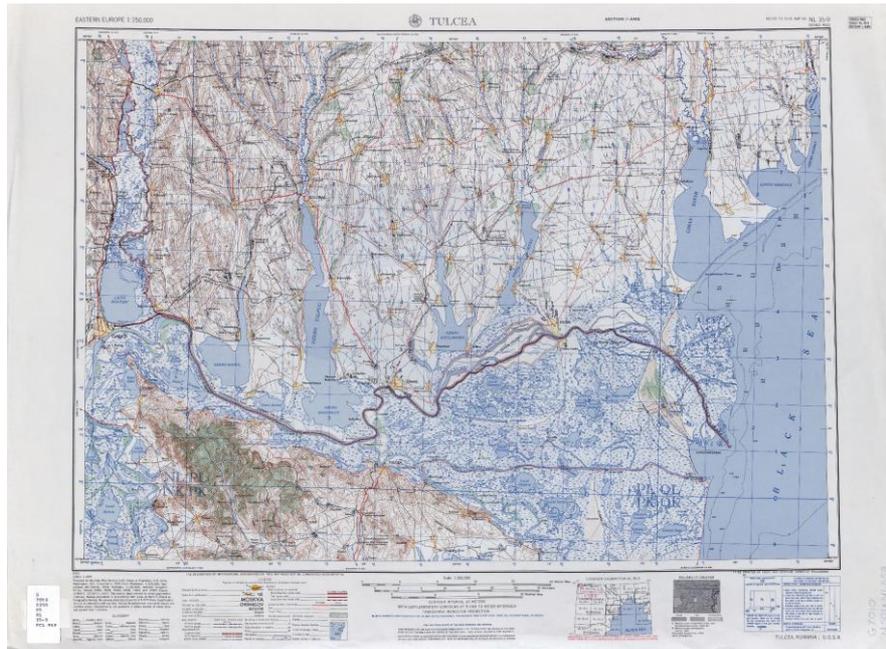


Figura IV.13. Cartografía de 1954.

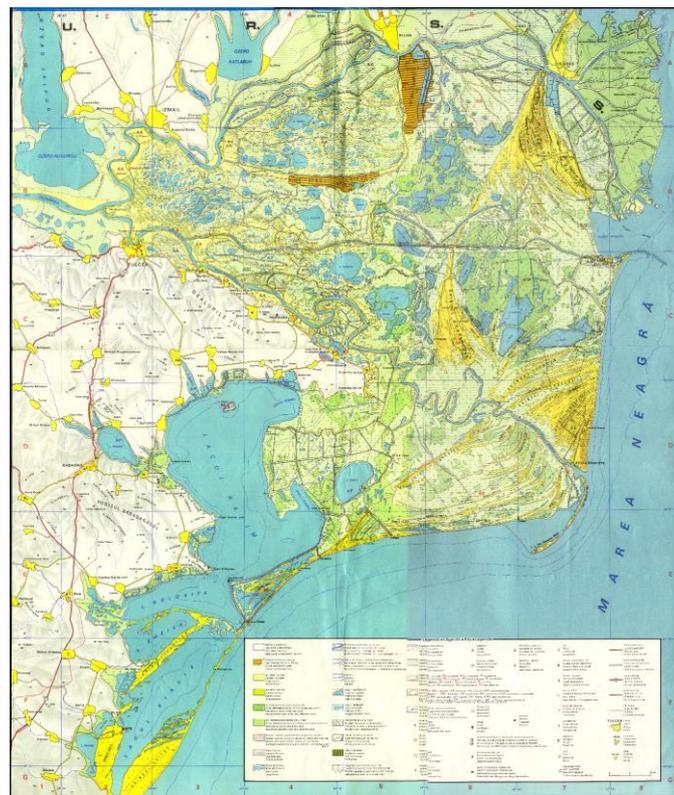


Figura IV.14. Cartografía de 1986.

Las cartografías de la segunda mitad del siglo XX son las más parecidas a la situación actual. Ya están los edificios actuales construidos y los depósitos deltaicos que se observan son, en su mayoría, los mismos que los reflejados en el mapa de suelos del Anexo III.