

MARIA JOÃO FEIO
VERÓNICA FERREIRA
(EDS.)

IMPRESA DA
UNIVERSIDADE
DE COIMBRA
COIMBRA
UNIVERSITY
PRESS

RIOS DE PORTUGAL

COMUNIDADES,
PROCESSOS E ALTERAÇÕES

CAPÍTULO 3

SEDIMENTOS

Pedro A. Dinis^{1*}, M. Conceição Freitas² & Pedro Pinto Santos³

¹MARE – Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Portugal, pdinis@dct.uc.pt

²Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, IDL e Departamento de Geologia da Universidade de Lisboa, Portugal, cfreitas@fc.ul.pt

³Centro de Estudos Geográficos do Instituto de Geografia da Universidade de Lisboa, Portugal, pmpsantos@campus.ul.pt

Resumo: Os volumes e características dos sedimentos fluviais são determinados por um conjunto de variáveis naturais, como o relevo, condições climáticas e geologia/geomorfologia das áreas de drenagem, a que se podem sobreimpor outras ligadas a ações antrópicas. Nesse sentido, a textura e composição dos sedimentos encerram em si importantes informações sobre as condições ambientais presentes nas áreas de drenagem, bem como sobre os seus recursos geológicos. É de prever que o relevo (altitude e declive das encostas) e a pluviosidade, que caracterizam as áreas do noroeste de Portugal, se conjuguem na promoção de débitos sedimentares relativamente elevados para a escala nacional. A produção de sedimentos também está dependente da presença de massas friáveis, como mantos de alteração ou uma cobertura sedimentar não consolidada, sendo ainda influenciada pelas formas de ocupação do solo. A textura dos sedimentos depende sobre-

tudo da textura dos principais materiais que os alimentam e das condições orográficas e morfológicas locais. A sua composição, por sua vez, é determinada fundamentalmente pela natureza das unidades líticas alflorantes, sendo possível considerar sedimentos distintos quando alimentados de áreas onde dominam rochas félsicas, máficas (menos comum em Portugal) e sedimentares a meta-sedimentares. Os sedimentos de grão mais fino (sobretudo os argilosos) estão tendencialmente mais afectados pelo clima na área de drenagem e carregam maiores quantidades de elementos poluentes que os materiais areno-cascalhentos.

Palavras-chave: classificação composicional, classificação textural, influências antrópicas, sedimento, sedimentogénese em bacias fluviais

1. Importância dos sedimentos fluviais

As águas escoadas pelos rios arrastam consigo um caudal sólido cujos volumes e características são determinados primordialmente pelo contexto climático e geológico-geomorfológico das bacias de drenagem (Figura 3.1). A investigação sobre os sedimentos em trânsito reveste-se de grande importância por diversas razões. Em primeiro lugar, porque estes materiais servem de suporte a formas de vida, estão associados a nutrientes fundamentais, alimentam as praias da região costeira e as margens estuarinas e, por eles próprios, podem ter um valor económico suficiente para justificar a sua exploração. Por outro lado, os sedimentos, em particular os de grão mais fino, têm a capacidade de reter substâncias potencialmente tóxicas, sendo considerados os principais reservatórios de poluentes em meio aquático¹. Assim, em função da forma de ligação química dos elementos e conseqüente biodisponibilidade, podem pôr em causa a

estabilidade de ecossistemas mais sensíveis. Mesmo tratando-se de materiais inertes, a simples acumulação em troços dos cursos fluviais pode trazer consigo um problema económico ou ambiental. Será esse o caso quando estes se depositam em albufeiras, diminuindo a capacidade de armazenamento de água, ou em determinados troços dos seus percursos, dificultando a drenagem e promovendo cheias. Finalmente, o volume e características dos sedimentos são excelentes indicadores (*proxies*) para estabelecer as características das áreas de drenagem e a sua evolução ao longo dos tempos.

A carga sólida pode ser encaminhada como carga de fundo, em suspensão ou dissolvida, sendo normal tomar as duas primeiras como as principais formas de transporte dos sedimentos, assumindo-se (por vezes erradamente, como no caso de rios que drenam terrenos com sucessões evaporíticas ou calcárias) que as quantidades de material em solução são desprezáveis. A diferença entre o transporte como carga de fundo e em suspensão é que no primeiro as partículas estão frequentemente em contacto com o fundo (tração ou saltação), enquanto no segundo a turbulência do fluido é suficiente para suportar as partículas e mantê-las suspensas e em movimento. O modo de transporte depende das características dos grãos e do próprio fluido, pelo que uma mesma partícula poderá ser transportada de diferentes formas se se alterarem características como a velocidade, turbulência e viscosidade da massa aquosa em movimento. Como o caudal transportado em suspensão é mais fácil de medir que o que segue como carga de fundo, é frequente proceder a estimativas da carga total apenas com base na carga em suspensão, não se considerando a componente de fundo ou fixando-se esta numa determinada proporção da carga total; esta estimativa não é prudente, uma vez que os valores de proporção geralmente adotados não assentam em quaisquer avaliações seguras². O facto de as componentes transportadas como carga de fundo terem diferentes composições e de os respetivos modos de transporte serem condicionados por diferentes

fatores^{3,4} faz com que as estimativas das cargas totais baseadas na componente em suspensão sejam de significado muito limitado.

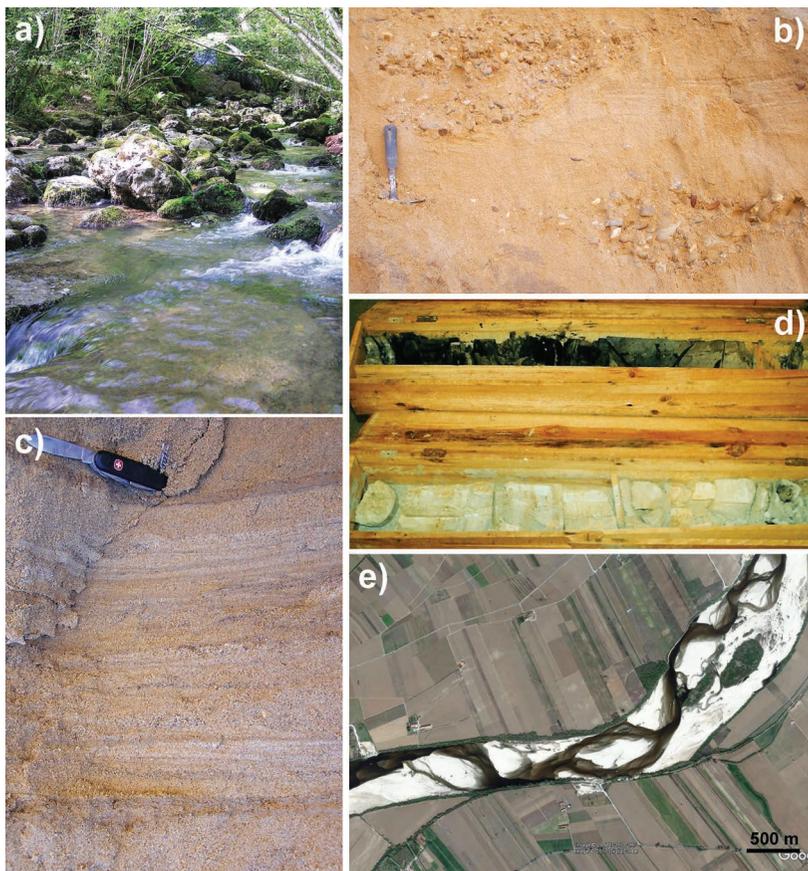


Figura 3.1. Alguns exemplos de sedimentos fluviais: a) grandes blocos no fundo da linha de água em rio de montanha; geralmente estes sedimentos não estão em equilíbrio com as condições dinâmicas do curso de água, sendo transportados por movimentos de massa nas vertentes envolventes; b) sedimentos de enchimentos de canal no rio Tejo; reconhecem-se corpos cascalhentos lenticulares no seio de um conjunto arenoso; c) sedimentos de planície de inundação no rio Tejo com lâminas argilosas e areno-argilosas intercaladas; d) sedimentos argilosos e turfosos depositados em pequenos lagos, ligados a depressões estruturais, no seio da bacia de drenagem do rio Vouga; e) canal do rio Tejo com um relevo condicionado por barras e dunas hidráulicas responsáveis por condições dinâmicas locais variáveis onde se esperam sedimentos de diferente granulometria (imagem de 23/3/2012 do *Google Earth*TM). Fotografias: a–d, Pedro Dinis.

O trânsito de sedimentos em sistemas fluviais enquadra-se no conjunto de processos que define um ciclo sedimentar. Em situações particulares pode ocorrer produção de sedimento por abrasão de material rochoso levemente meteorizado (i.e., pouco alterado pelos processos superficiais que promovem a decomposição e desintegração dos corpos líticos), mas a grande maioria do caudal sólido resulta do dismantelamento dos mantos de alteração que cobrem massas rochosas, ou da reciclagem de conjuntos sedimentares pouco consolidados. Durante um ciclo sedimentar têm lugar outros processos que podem alterar a composição dos sedimentos em trânsito, como a seleção hidráulica em função de tamanho, forma e densidade, a desintegração de partículas frágeis, entre outros. Uma parte deste caudal sólido fica retido em setores de menor hidrodinamismo dos cursos de água enquanto o restante procede o seu caminho até alcançar a região litoral. Os sedimentos areno-cascalhentos e silto-argilosos retidos nos fundos ou margens de canais fluviais constituem bons *proxies* da composição das frações transportadas como carga de fundo e em suspensão. Contudo, o conhecimento da composição destes materiais pouco dirá sobre os volumes transportados.

Do exposto até aqui, torna-se evidente a dificuldade em obter um bom conhecimento da natureza e volumes de sedimento transportados por rios. No caso dos rios de Portugal, ainda que no passado tenham sido desenvolvidos numerosos trabalhos técnicos e académicos que envolveram uma caracterização de sedimentos fluviais, estes não estão distribuídos de forma equilibrada pelo território nacional nem seguiram as mesmas orientações metodológicas. Mesmo que dados equilibrados estivessem disponíveis, não seria possível proceder à sua apresentação no espaço do presente capítulo. Optou-se, em alternativa, por fazer um enquadramento sobre os esquemas de classificação dos sedimentos, uma análise dos fatores naturais que condicionam os volumes e a composição dos caudais sólidos transportados pelos rios, de forma a esboçar traços gerais sobre a

sua natureza nos rios portugueses. Posteriormente, apresentam-se exemplos da aplicação dos sedimentos como ferramentas de diagnóstico das condições ambientais em bacias hidrográficas de rios portugueses e uma discussão sobre os efeitos que diversas ações humanas podem ter nas características dos sedimentos fluviais.

2. Classificação de sedimentos

Na classificação de sedimentos tomam-se em consideração aspetos texturais, composicionais e da sua estruturação sedimentar. As classificações texturais, baseadas na dimensão das partículas, e composicionais, baseadas na mineralogia dos elementos constituintes, são as mais usadas, assentando frequentemente numa projeção em diagramas triangulares polarizada em três termos fundamentais (Figura 3.2).

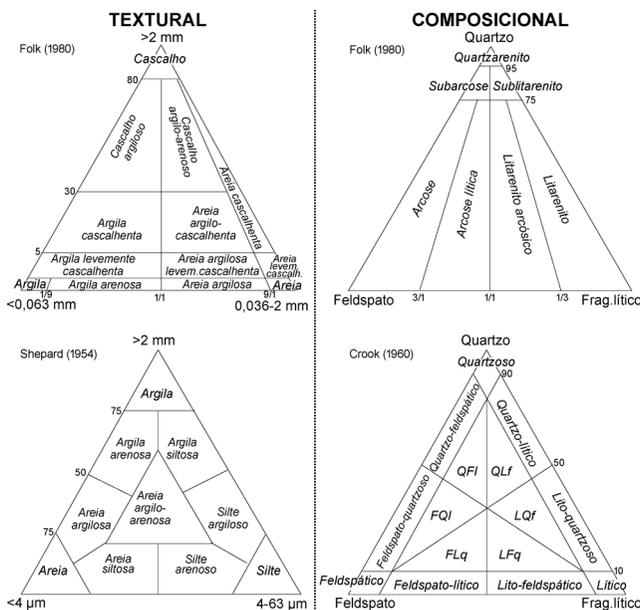


Figura 3.2. Exemplos de classificações de sedimentos baseadas na granulometria (textural) e na natureza dos elementos constituintes (composicional) projetadas em diagramas triangulares²⁶⁻²⁸.

É comum aplicar uma transformação logarítmica da dimensão das partículas para definir a escala granulométrica. As mais frequentes estão baseadas na escala logarítmica de Udden-Wentworth, onde as várias classes seguem a transformação $\Phi = -\log_2 X$, sendo X o diâmetro dos grãos em mm. Os limites entre as principais frações granulométricas posicionam-se em números inteiros da escala de Φ (8 ou 9 Φ para o limite argila-silte; 4 Φ para o limite silte-areia; -1 Φ para o limite superior da areia).

De um modo geral, as partículas de maiores dimensões (> 5 cm) são medidas diretamente com uma régua ou com uma craveira, enquanto as percentagens das partículas da gama dimensional intermédia (ca. 0,031–50 mm) são determinadas por crivagem. Desenvolveram-se várias técnicas para a quantificação das partículas de menores dimensão. As mais populares são as que se baseiam nos processos de sedimentação, considerando a sedimentação de partículas de acordo com a lei de Stokes (que relaciona a velocidade de sedimentação com a aceleração da gravidade e um conjunto dos parâmetros do fluido e das partículas, incluindo o raio das partículas), e a difração de raios laser⁵. Para se obter um bom conhecimento do tamanho das partículas de um sedimento é necessário determinar a sua curva de distribuição. Esta deve ser obtida com análises adaptadas a escalas de Φ com boa resolução e intervalos regulares (p.ex., 1/2 ou 1/4 Φ).

Os sedimentos arenosos ou areno-cascalhentos são também classificados com base nas proporções relativas dos seus componentes minerais (mineroclastos) mais comuns (quartzo, feldspato) e fragmentos líticos (litoclastos). No caso de sedimentos com quantidades significativas de litoclastos, é frequente diferenciá-los também em fragmentos de rochas sedimentares, ígneas e metamórficas. De entre os restantes elementos constituintes, os que geralmente são mais comuns são filossilicatos e minerais pesados (minerais com densidade superior a 2,9). Há razões fortes para estes constituintes serem postos de lado nos esquemas de classificação.

Por um lado porque, com a exceção de algumas situações particulares (por exemplo em depósitos detríticos enriquecidos em minerais pesados), as suas quantidades tendem a ser reduzidas. Por outro lado, como estes componentes estão fortemente condicionados pela seleção hidráulica, considerá-los pode introduzir um nível de complexidade adicional, enviesando as conclusões para significados fortemente condicionados pelas condições de transporte local. Ainda que não fundamentem as classificações, eles podem distinguir associações composicionais que de outra forma se revelam muito homogêneas, contendo em si importante informação sobre os processos genéticos, e é neles que se concentra a maioria de elementos metálicos que podem apresentar alguma toxicidade e, em muitos casos, podem constituir recursos com interesse económico.

No que respeita aos sedimentos de grão fino, não são usuais classificações em diagramas triangulares com base na mineralogia. Nas frações mais grosseiras destes sedimentos (digamos, de silte ou areia fina) podem ser encontrados os mesmos elementos que suportam as classificações dos materiais areno-conglomeráticos, mas a sua quantificação é mais difícil. Em frações de menor calibre (silte fino e argila) os minerais de argila passam a estar mais bem representados. Estes, a par da matéria orgânica e dos óxidos e hidróxidos de ferro e manganés, são particularmente importantes por poderem carregar consigo metais adsorvidos que são facilmente libertados. Dada a dificuldade em identificar as partículas constituintes e, conseqüentemente, proceder a uma classificação composicional de sedimentos de grão fino, é frequente valorizar outros aspetos, como a cor. Esta, de forma indireta, reflete a natureza dos elementos constituintes. A escala de Munsell é provavelmente a mais popular quando se procede a uma classificação da cor, mas existem outras que servem melhor em análises estatísticas⁶.

Tal como com a medição da granulometria, não existe um método que seja usado de forma rotineira para determinar a composição dos

sedimentos. Se as frações mais grosseiras são usualmente determinadas diretamente no campo, a componente arenosa tende a ser identificada com recurso à lupa ou microscópio petrográfico e a difração de RX ou a geoquímica são aplicadas para as frações mais finas. Estas duas metodologias também podem ser aplicadas a frações mais grosseiras, mas carecem de um processo prévio de moagem e os resultados não permitem conhecer a mineralogia de forma quantitativa.

3. Fatores determinantes da sedimentogénese em bacias de drenagem

3.1. Fisiografia

Diversos autores mostraram que existe uma relação robusta entre a morfologia da bacia de drenagem e os volumes de sedimento produzidos, verificando-se uma boa correlação desta com a área e o relevo da bacia⁷. Nesse sentido, têm sido formuladas funções exponenciais que relacionam os caudais sólidos com estas variáveis fisiográficas das bacias de drenagem. Se estivermos interessados em estabelecer o fornecimento sedimentar específico (i.e., carga sedimentar descarregada por uma bacia de drenagem por unidade de tempo e de área), a dimensão da bacia de drenagem surge como um fator fisiográfico com efeitos mais complexos. De facto, modelos de previsão do fornecimento sedimentar específico revelam que em bacias de drenagem maiores geram-se condições favoráveis à retenção transitória de uma parte significativa dos volumes sedimentares em planícies de inundação e noutros locais de menor hidrodinamismo⁸. Assim, apesar de os rios maiores debitarem maiores volumes de sedimento, é de esperar que uma parte significativa acabe por ficar retida nos vales fluviais.

As características gerais do relevo português foram tratadas em diversas sínteses geográficas⁹. É frequente destacar uma assimetria norte-sul, ainda que as linhas divisórias não sejam consensuais, e um eixo diferenciador litoral-interior. Genericamente, o norte do país apresenta relevo mais acentuado e, se não se considerarem os pequenos relevos montanhosos da Estremadura e Algarve, maior contraste com a região litoral que a sua região sul. Se tomarmos a evolução geológica como fundamental à separação de domínios morfológicos, realça-se a individualização das unidades morfo-tectónicas Maciço Antigo, Orlas Mesocenoicas e Bacias Cenozoicas do Tejo e Sado. A divisão norte-sul mais consensual segue a Cordilheira Central, que surge bem marcada em Portugal em terrenos do Maciço Antigo, mantendo-se como característica fisiográfica fundamental para oriente, em Espanha.

3.2. Clima

O clima tem um papel fundamental nos processos de produção de sedimentos. Ele condiciona não só os volumes produzidos como, em virtude da decomposição dos elementos menos resistentes, a própria composição dos materiais. Todavia, refletindo manifestações indiretas do clima e interações, em particular no que respeita à relação entre variáveis climáticas e a natureza do coberto vegetal, o efeito é bastante complexo. Assim, ainda que seja normal observarem-se maiores volumes de sedimento produzido em resposta ao aumento da precipitação atmosférica, em situações particulares pode-se verificar o oposto⁷. A temperatura tem aqui um papel secundário, manifestando-se sobretudo como um fator condicionador do crescimento vegetal e dos processos de meteorização. Outras variáveis climáticas, como por exemplo a velocidade e orientação dos ventos, serão potencialmente decisivas em ambientes fortemente influenciados pela deflação eólica ou quando o transporte das partículas pelo ar é

fundamental para as formas de distribuição de sedimentos. As zonas costeiras despidas de vegetação são bons exemplos desta situação.

Independentemente da posição mais ou menos interior ou setentrional, o clima no território continental português revela uma influência mediterrânica marcada pela alternância de uma estação seca e quente com uma estação mais fresca em que se concentra a maioria da precipitação (clima de tipo Cs, segundo Koppen⁹). Estas estações acabam por se prolongar no tempo de forma diferenciada, tendo-se um período seco particularmente curto na zona noroeste e alargado na zona sul do país, refletindo uma maior influência Atlântica na primeira (subtipo Csb) e Mediterrânica na segunda (subtipo Csa). Alguns setores interiores da bacia hidrográfica do Douro no Nordeste Transmontano do país e do litoral Alentejano e oeste-Algarvio constituem exceções de maior expressão a este padrão simples. Adicionalmente, observam-se condições climáticas sazonalmente mais contrastadas no interior e de maior homogeneidade no litoral e é frequente haver maior precipitação em regiões de maior altitude, onde a temperatura é significativamente mais baixa.

3.3. Aspetos locais das bacias de drenagem

Se no caso de grandes bacias de drenagem (> 10.000 km², valor alcançado apenas pelos 3 maiores rios internacionais que atravessam o país) parece ser possível estabelecer relações entre algumas características gerais das bacias (p.ex., relevo, área de drenagem, precipitação) e os volumes de sedimento produzidos, quando se procede a estudos para bacias de drenagem menos extensas outros fatores locais passam a ser decisivos. Aqui, aspetos como a natureza do substrato geológico e dos solos, ocupação dos solos e relações locais entre características geomórficas podem promover valores anómalos de fornecimento sedimentar em diferentes sectores da

bacia de drenagem, fazendo com que os volumes e as características dos materiais debitados se desviem daquilo que seria esperado se considerássemos apenas as características gerais da bacia hidrográfica. De facto, nos rios maiores tem-se um número de tal maneira elevado de características locais que os efeitos destas acabam por se anular, subsistindo as tendências gerais para a bacia como um todo¹¹. Nesse sentido, a adoção das mesmas metodologias em análises de sistemas de drenagem de diferentes escalas acabará por fornecer resultados muito díspares. Por outro lado, os modelos concebidos para uma região do Globo podem não ser aplicáveis noutras posições. A região mediterrânica merece aqui uma atenção especial¹², designadamente pelas suas características climáticas (chuva concentrada na estação mais fria e grandes flutuações a diversas escalas na intensidade da precipitação), orográficas (frequência de encostas muito declivosas e com grandes desníveis entre as linhas de cumeada e os fundos aluviais) e de ocupação do solo (com um povoamento denso e uma história milenar de uso dos solos para atividades agrícolas, incluindo em áreas de declive acentuado).

O relevo da zona mediterrânica é fortemente condicionado pela deformação alpina, mas também reflete uma grande heterogeneidade na natureza das litologias aflorantes e os padrões de distribuição de unidades que resistem de formas diferenciadas à meteorização e erosão. É naturalmente de prever que os processos erosivos sejam mais intensos em locais com materiais friáveis ou pouco consolidados e quando as rochas se apresentam muito alteradas. No que respeita ao uso dos solos, diversos trabalhos demonstram que a erosão tende a ser mais intensa em áreas agrícolas, em particular quando se tem uma ocupação com vinhas e cereais, do que em domínios florestais¹³. O efeito de algumas propriedades geomórficas na produção de sedimentos foi demonstrado em diversos trabalhos sobre bacias de drenagem de pequena e média dimensão da Península Ibérica¹³⁻¹⁵.

4. Sedimentos nos rios portugueses

Estabelecer uma ligação entre a área de drenagem e as características do sedimento produzido não é tarefa fácil. Em primeiro lugar, porque há que ter em conta as transformações composicionais que decorrem dos processos de meteorização. Como boa parte dos sedimentos transportados em suspensão são de facto solo erodido das bacias de drenagem, é normal que a sua composição esteja fortemente influenciada pelos processos de alteração química à superfície da Terra¹. Desta forma, os sedimentos em suspensão apresentam-se significativamente empobrecidos em elementos móveis (Na, Ca, Mg, K, etc.) e enriquecidos nos menos móveis (Al, Ti e numerosos elementos menores ou traço como as terras raras, Zr, Th, Cr, etc.) quando comparados com as rochas das áreas de alimentação. Os sedimentos transportados como carga de fundo de rios pequenos em regiões de clima seco apresentam uma composição química e mineralógica bastante próxima da das rochas que afloram na bacia de drenagem¹⁶. Podia-se esperar um panorama completamente diferente em grandes rios de regiões de clima húmido, mas mesmo aqui a composição dos sedimentos areno-cascalhentos pode ser pouco influenciada pelos processos de meteorização e as diferenças limitam-se a algum empobrecimento nos elementos mais móveis⁴.

Quando nos focamos exclusivamente na carga de fundo, a composição dos sedimentos poderá (i) refletir uma mistura, com proporções variáveis em função das condições de erodibilidade e erosividade, de materiais provenientes de áreas com diferentes substratos geológicos, (ii) ou estar fortemente influenciada por transformações ocorridas durante o ciclo deposicional¹⁷. Se considerarmos o primeiro caso, uma bacia de drenagem heterogénea poderá originar sedimentos com uma grande diversidade de elementos constituintes, ao passo que com o segundo, os processos de seleção sedimentar podem originar sedimentos com um número reduzido de elementos cons-

tituintes. Finalmente, a composição mineralógica depende muito da granulometria do sedimento, estando esta condicionada pela geologia das áreas de alimentação e pelas condições de transporte. Apesar destas dificuldades, é possível prever algumas características dos materiais produzidos com base na geologia, morfologia e clima na bacia drenagem.

De um modo geral, as condições orográficas (maior altitude e relevo mais acentuado) e climáticas (maior precipitação) devem promover uma maior produção de sedimentos nas regiões setentrionais de Portugal (Figura 3.3). Estas serão particularmente elevadas em sectores com encostas mais declivosas, onde os processos erosivos tendem a avançar rapidamente, promovendo a remoção do rególito. Naturalmente, a não progressão da meteorização com conseqüente desenvolvimento de solos peliculares e pedregosos acabará por limitar a acção erosiva. Como se discutiu acima, os fornecimentos sedimentares específicos também vão depender de diversos fatores locais. No que respeita à litologia, as sucessões sedimentares com materiais pouco consolidados são muito mais vulneráveis à erosão que as unidades do substrato em que assentam. Estes materiais estarão relativamente protegidos dos processos erosivos quando se posicionam em zonas baixas, mas em posições de encosta nos relevos regionais suportados por rochas do soco e nas encostas de transição entre superfícies aplanadas estarão sujeitos a rápido desmantelamento. Havendo uma cobertura de rególito disponível, a produção de sedimentos será maior em locais menos protegidos pela vegetação.

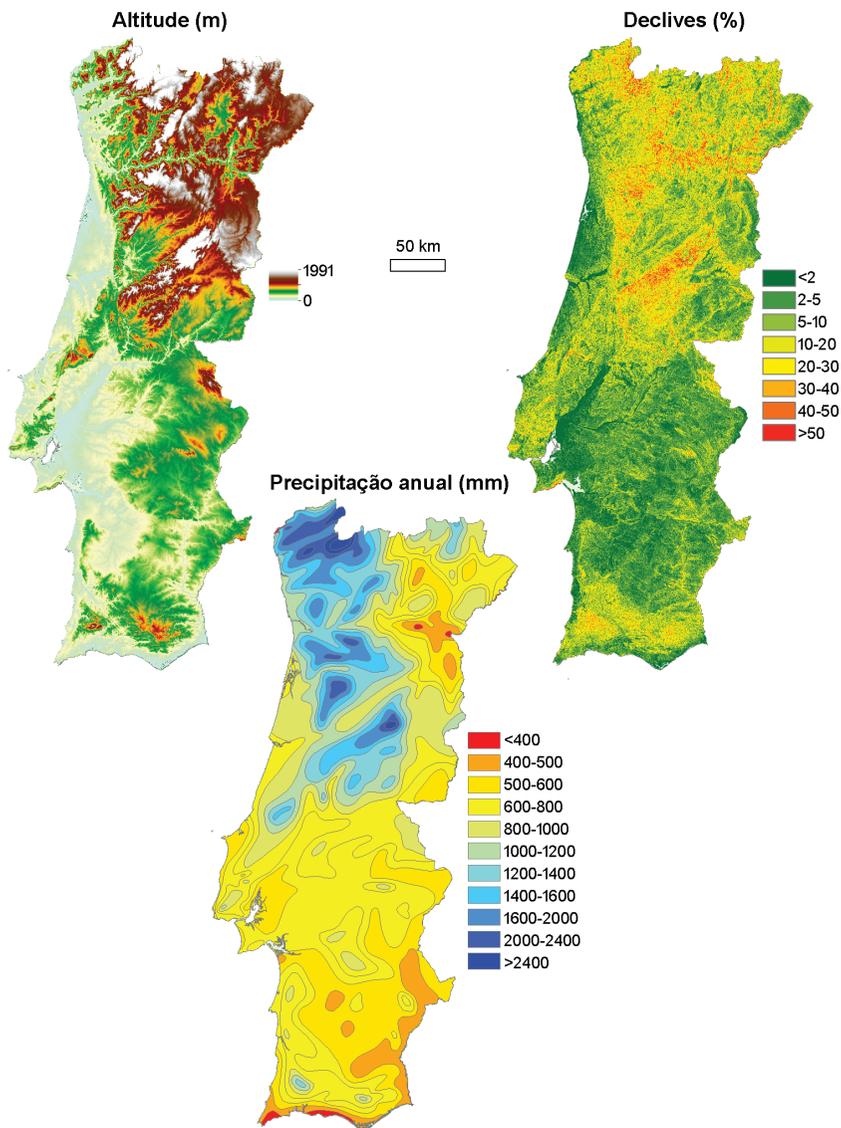


Figura 3.3. Algumas características orográficas e climáticas condicionadoras dos volumes de sedimento produzido em bacias de drenagem de Portugal continental. Elementos orográficos baseados no modelo digital de terreno *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) com uma resolução espacial de 30 metros. Dados de precipitação média anual retirados do Atlas do Ambiente (<http://sniamb.apambiente.pt/Home/Default.htm>).

É possível prever algumas características dos sedimentos fluviais em função da natureza do substrato geológico (crosta continental ou oceânica), das condições de soerguimento e denudação, da presença de unidades sedimentares de cobertura e dos efeitos da meteorização¹⁸. A Figura 3.4 apresenta a distribuição espacial de unidades geológicas cujas características condicionam o volume e composição de sedimentos produzidos. Nas áreas de crosta continental onde dominam granitóides, refletindo estados de denudação avançados, serão geradas associações mineralógicas de quartzo e feldspato, sendo este tendencialmente mais comum em zonas de declives mais acentuados e quando as bacias de drenagem forem pequenas; nas áreas onde dominam rochas metamórficas com protólito sedimentar siliciclástico (quartzito, metapelito, metagrauvaque, micaxisto, etc.) espera-se uma maior produção de fragmentos líticos no caso de sedimentos cascalhentos, mas os sedimentos arenosos devem apresentar associações mineralógicas quartzosas. Porções de crosta oceânica, já muito dissecada, encontram-se em pequenas manchas do NE transmontano e Baixo Alentejo. É de prever que estas regiões forneçam sedimentos enriquecidos em minerais ferro-magnesianos e em fragmentos de rochas ígneas e metamórficas que integram estes minerais. Esta alimentação deve manifestar-se nas proximidades dos afloramentos de rochas máficas e ultra-máficas (de cor escura e ricas em silicatos de Fe e Mg), mas, dada a sua reduzida expressão espacial no território português, tenderá a diluir-se com os sedimentos derivados das zonas com composição mais félsica (rica em elementos mais leves, como o Si, Al, Na e K) que predominam no Maciço Antigo.

Como é próprio de sedimentos reciclados, os materiais transportados a partir das orlas e das bacias mesocenozóicas devem estar enriquecidos em elementos resistentes à abrasão mecânica e alteração química (quartzo) ou produzidos durante os estágios finais de meteorização (caulinite e óxidos-hidróxidos), quando comparados com os alimentados das unidades ígneas e metamórficas do substrato

Precâmbrico-Paleozóico¹⁹. As frações mais grosseiras em sedimentos de rios pequenos podem incorporar uma quantidade significativa de clastos de rochas sedimentares e ígneas. A erosão nas bacias de drenagem que se estendem pelas orlas mesocenozóicas (bem como por unidades metamórficas ricas em componente carbonatada do substrato) também será condicionada por processos químicos de dissolução. Estes acabam por se refletir numa significativa carga sólida transportada em solução.

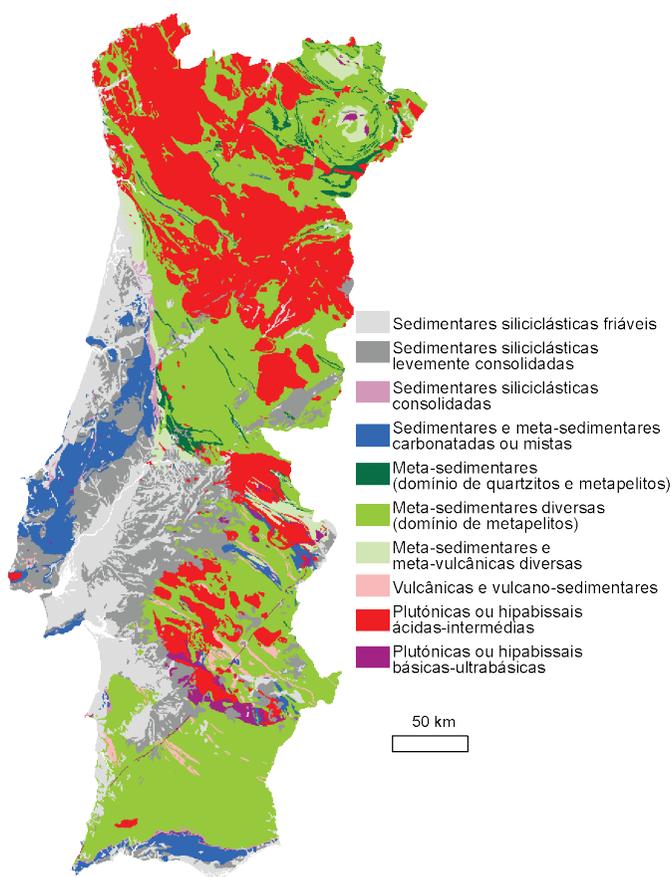


Figura 3.4. Grandes unidades litológicas de Portugal continental organizadas em função dos volumes e características de sedimento potencialmente produzido.

5. Efeito das acções antrópicas no volume e composição dos sedimentos

Os sedimentos fluviais e estuarinos, principalmente os de granulometria mais fina, registam na sua composição as modificações ambientais ocorridas ao longo do tempo, incluindo as perturbações associadas à actividade antrópica (industrial, agrícola) nas respetivas bacias de drenagem e esse registo é útil no estudo da contaminação/poluição de sedimentos.

Os tipos mais comuns de poluição são de natureza orgânica (decorrente da aplicação de agroquímicos: pesticidas – herbicidas, insecticidas e rodenticidas – e fertilizantes) e inorgânica (substâncias químicas que contêm pouco ou nenhum carbono, principalmente metais pesados e semi-metais (As)). Muitos dos compostos orgânicos são biodegradáveis mas outros não, e estes persistem na água ou nos sedimentos por muitos anos (pois têm uma semi-vida muito longa) e concentram-se ao longo da cadeia alimentar.

No que respeita aos metais pesados, pelo seu número de oxidação, são adsorvidos rapidamente pelos minerais de argila e tendem a criar fortes ligações com a superfície das partículas. Independentemente da sua origem, quando entram no meio aquático os metais vão contribuir para a composição do material em suspensão que posteriormente será depositado nos sedimentos de fundo, que funcionam como reservatório de metais²⁰. Este processo de adsorção-deposição faz com que os sedimentos contenham um registo das condições ambientais contemporâneas à sua deposição, uma vez que os metais apresentam uma taxa de difusão extremamente baixa, permanecendo praticamente imóveis desde o momento da sua deposição. A sua grande resistência à degradação microbiana, particular reactividade e período de semi-vida elevado (persistindo inalterados durante anos), são características que tornam estes elementos altamente prejudiciais, originando

muitas vezes níveis de toxicidade elevada. É pois fundamental monitorizar as respetivas concentrações absolutas, não só à superfície mas também em profundidade. O estudo do perfil vertical do conteúdo metálico de uma coluna sedimentar é uma excelente ferramenta para estabelecer os efeitos dos processos naturais e antropogénicos em meios deposicionais aquáticos, permitindo identificar contributos históricos, tendências e flutuações temporais dos metais existentes²⁰.

Ferreira²¹ analisou mais de 650 amostras de sedimentos de corrente de Portugal continental e estabeleceu relações entre a geoquímica dos sedimentos fluviais e as litologias da bacia hidrográfica, zonas geoestruturais e influência antrópica. No que respeita a esta última, o autor encontrou valores acima da referência para Cr, Cu, Pb, Zn e Ni, explicados por actividade industrial e mineira, pela indústria pesada, elevado tráfego automóvel e actividade agro-pecuária intensa. Os organismos bentónicos estão entre os mais vulneráveis aos efeitos nefastos destes contaminantes, podendo bioacumulá-los e eventualmente biomagnificá-los ao longo da cadeia alimentar; porém estes efeitos dependem do organismo em si, dos mecanismos de alimentação, e da especiação e metabolismo do elemento em causa.

Não é apenas a qualidade do sedimento que é alterada por ação antrópica, a quantidade também o é. As principais ações humanas que contribuem para este facto são a construção de barragens e a extração de areias nos leitos fluviais. Estima-se que atualmente as barragens sejam responsáveis pela retenção de mais de 80% dos volumes de areias que eram transportadas pelos rios antes da respetiva construção²². Esta redução associa-se não só ao efeito de retenção sedimentar nas albufeiras mas também à regularização das velocidades, resultante da atenuação das cheias. As implicações desta retenção fazem-se sentir a jusante das barragens e até ao litoral, passando pela transformação dos ecossistemas ribeirinhos

e estuarinos e ainda pelos problemas de erosão costeira devidos ao défice de sedimentos para incorporar na deriva litoral ou ainda para construir ambientes intertidais como sapais e rasos de maré. Esta problemática ganha importância no contexto das alterações climáticas e subida do nível médio do mar, a ponto de a remoção de barragens em fim de vida ser já uma prática comum na Europa nos anos mais recentes²³. Quanto à extração de areias, dados compilados por Santos et al.²² e referentes ao Estudo do Mercado de Inertes em Portugal Continental, promovido em 2003 pelo então Instituto da Água, permitem estimar que, àquela data, cerca de 1/3 das areias comercializadas para construção civil e obras públicas eram obtidas no domínio hídrico, sendo entre 54% e 66% dos inertes extraídos em portos e os restantes extraídos no rio Tejo. Este esforço de extração de inertes em domínio hídrico, corresponde a alguns milhões de m³/ano de areias.

Finalmente, importa referir as ações relacionadas com a alteração do traçado dos rios ou execução de obras hidráulicas. Estas alterações relacionam-se com os aspectos de navegação (por causa do estreitamento e assoreamento dos leitos dos canais navegáveis), de defesa das margens e áreas vizinhas contra as cheias e de aproveitamento agrícola da planície aluvial. No rio Tejo é algo que acontece desde há muito²⁴, estando reportadas, desde pelo menos a época romana, aberturas de novos braços e alvercas para melhorar o escoamento, mudanças de traçado para evitar que as terras pertencentes à Coroa portuguesa fossem cobertas por areias transportadas durante as maiores cheias, abertura de caneiros para que o peixe pudesse subir até Espanha, alargamento de canais para melhoria da navegabilidade, limpeza de valas para melhorar a evacuação das águas em épocas de cheias, construção de diques para protecção de zonas marginais mais baixas. Também no Mondego são seculares as notícias de intervenções de regularização do leito²⁵.

6. Outras leituras

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA): <http://www.apambiente.pt/>
- Birot P. 1950. *Le Portugal*. A. Colin. France, Paris
- Delestrac D., Rappeneau G. & Mini L. 2013. Sand Wars. <http://utahmtb.com/sand-wars-full-documentary/>
- Dias J.M.A. 2004. *A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinbos (Uma Introdução à Oceanografia Geológica)*. http://w3.uaig.pt/~jdias/JAD/eb_Sediment.html
- European Sediment Network (SedNet). <http://sednet.org/>
- Galopim de Carvalho A.M. 2003. *Geologia Sedimentar. Volume I–Sedimentogénese*. Âncora Editora. Portugal, Lisboa
- Girão A. 1933. *Esboço de uma carta regional de Portugal*. Imprensa da Universidade. Coimbra. Portugal, Coimbra
- Miller J.R. & Miller S.M.O. 2007. *Contaminated rivers: a geomorphological-geochemical approach to site assessment and remediation*. Springer Science & Business Media. The Netherlands, Dordrecht
- Robbins J. 2017. Why the world's rivers are losing sediment and why it matters. Yale Environment 360. Yale School of Forestry & Environmental Studies. <https://e360.yale.edu/features/why-the-worlds-rivers-are-losing-sediment-and-why-it-matters>
- Tockner K., Uehlinger U. & Robinson C.T. 2009. *Rivers of Europe*. Academic Press. USA, San Diego

7. Referências bibliográficas

- ¹Viers J., Dupré B. & Gaillardet J. 2009. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: new insights from a new database. *Sci. Total Environ.* 407: 853–868
- ²Turowski J.M., Rickenmann D. & Dadson S.J. 2010. The partitioning of the total sediment load of a river into suspended load and bedload: a review of empirical data. *Sedimentology* 57: 1126–1146
- ³Garzanti E., Andó S., France-Lanord C., Censi P., Vignola P., Galy V. & Lupker M. 2011. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 2. Suspended-load silt (Ganga–Brahmaputra, Bangladesh). *Earth Planet. Sci. Lett.* 302: 107–120
- ⁴Garzanti E., Andó S., France-Lanord C., Vezzoli G., Censi P., Galy V. & Najman, Y. 2010. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments: 1. Bedload sand (Ganga–Brahmaputra, Bangladesh). *Earth Planet. Sci. Lett.* 299: 368–381
- ⁵Goossens D. 2008. Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: a comparative study of ten instruments for wet analysis. *Sedimentology* 55: 65–96.
- ⁶Rossel R.V., Minasny B., Roudier P. & McBratney A.B. 2006. Colour space models for soil science. *Geoderma* 133: 320–337

- ⁷Syvitski J.P. & Milliman J.D. 2007. Geology, geography, and humans battle for dominance over the delivery of fluvial sediment to the coastal ocean. *J. Geol.* 115: 1–19
- ⁸De Vente J. & Poesen J. 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Sci. Rev.* 71: 95–125
- ⁹Ribeiro O. 1991. *Portugal, o Mediterrâneo e o Atlântico*. Livraria Sá da Costa. Coimbra.
- ¹⁰Peel M.C., Finlayson B.L. & McMahon T.A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydr. Earth Syst. Sci.* 11: 1633–1644
- ¹¹Vanmaercke M., Poesen J., Verstraeten G., de Vente J. & Ocakoglu F. 2011. Sediment yield in Europe: spatial patterns and scale dependency. *Geomorphology* 130: 142–161
- ¹²García-Ruiz J.M., Nadal-Romero E., Lana-Renault N. & Beguería S. 2013. Erosion in Mediterranean landscapes: changes and future challenges. *Geomorphology* 198: 20–36
- ¹³García-Ruiz J.M. 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: a review. *Catena* 81: 1–11
- ¹⁴Verstraeten G., Poesen J., de Vente J. & Koninckx X. 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology* 50: 327–348
- ¹⁵Bakker M.M., Govers G., van Doorn A., Quetier F., Chouvardas D. & Rounsevell M. 2008. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: the importance of landscape pattern. *Geomorphology* 98: 213–226
- ¹⁶Pinto M.M.C., Dinis P.A., Silva M.M. & da Silva E.A.F. 2016. Sediment generation on a volcanic island with arid tropical climate: a perspective based on geochemical maps of topsoils and stream sediments from Santiago Island, Cape Verde. *Appl. Geochem.* 75: 114–124
- ¹⁷Weltje G.J. 2012. Quantitative models of sediment generation and provenance: state of the art and future developments. *Sed. Geol.* 280: 4–20
- ¹⁸Garzanti E. 2016. From static to dynamic provenance analysis-Sedimentary petrology upgraded. *Sed. Geol.* 336: 3–13
- ¹⁹Dinis P. & Oliveira Á. 2016. Provenance of Pliocene clay deposits from the Iberian Atlantic Margin and compositional changes during recycling. *Sed. Geol.* 336: 171–182
- ²⁰Moreira S. 2014. Contributo da geoquímica e sedimentologia na caracterização de influências antropogénicas em ambientes estuarinos. Dissertação de Doutoramento em Geologia, Especialidade Geoquímica, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Portugal, Lisboa
- ²¹Ferreira A. 2000. Dados geoquímicos de base de sedimentos fluviais de amostragem de baixa densidade de Portugal continental: estudo de factores de variação regional. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Aveiro. Portugal, Lisboa
- ²²Santos F.D., Mota Lopes A., Moniz G., Ramos L. & Taborda R. 2014. Gestão da zona costeira. O desafio da mudança. Relatório do Grupo de Trabalho do Litoral. Portugal, Lisboa

- ²³Bednarek A.T. 2001. Undamming rivers: a review of the ecological impacts of dam removal. *Environ. Manag.* 27: 803–814
- ²⁴Nunes E.M.V. 2001. Estudo multidisciplinar da variabilidade temporal e espacial do Tejo na região de Santarém. Dissertação de Mestrado em Geologia Dinâmica, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Portugal, Lisboa
- ²⁵Viseu T., Alves E., Matos R.S. & Mendes L.S.S. 2012. Estudo das inundações do Rio Mondego a jusante da confluência do Rio Ceira. Relatório 333/2012, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulica, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal, Coimbra
- ²⁶Folk R.L. 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company. USA, Austin
- ²⁷Shepard F.P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *J. Sed. Res.* 24: 151–158
- ²⁸Crook K.A. 1960. Classification of arenites. *Am. J. Sci.* 258: 419–428