

MARIA ASSUNÇÃO FAUS DA SILVA DIAS

Efeito estufa e mudanças climáticas regionais

**MARIA ASSUNÇÃO
FAUS DA SILVA
DIAS** é professora do
Departamento de Ciências
Atmosféricas do Instituto
de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas
da USP e coordenadora
do Centro de Previsão do
Tempo e Estudos Climáticos
do Inpe.

a

s ciências do meio ambiente têm como um dos seus grandes desafios científicos o aprofundamento e a ampliação do conhecimento das interações complexas associadas ao efeito estufa.

A consequência do efeito estufa na forma de aquecimento global configura-se no que entendemos por mudança climática; mas, se olharmos para o passado remoto de nosso planeta, veremos que mudanças climáticas em escala geológica fazem parte da evolução natural ocorrendo ao longo de centenas e milhares de anos e repetindo-se em intervalos irregulares. O fato inusitado de nossos tempos é a velocidade com que as mudanças estão ocorrendo, sobrepondo-se à variabilidade climática corriqueira, que identificamos como natural, e causando efeitos visíveis, que atribuímos de forma genérica à ação poluidora do homem, tais como derretimento do Mar Ártico, das geleiras dos Andes e uma intensificação dos eventos extremos como furacões.

Dentre os diversos aspectos associados à questão das mudanças climáticas está a discussão sobre o que acontece regionalmente em termos de temperatura e chuva, e como separar os diversos componentes que podem alterar o quadro de mudanças como o uso da terra e a poluição atmosférica na forma de gases e de material particulado em suspensão, o chamado aerossol. Outro grande problema é entender as escalas de tempo envolvidas nas mudanças observadas e como separar o que é um extremo climático natural daquele que é consequência de alterações na terra e no ar provocadas pela nossa civilização.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS VS REGIONAIS

As mudanças climáticas globais associadas ao efeito estufa incluem aumentos de temperatura, elevação do nível dos mares e aumento da frequência dos eventos extremos. Em termos de temperatura, o

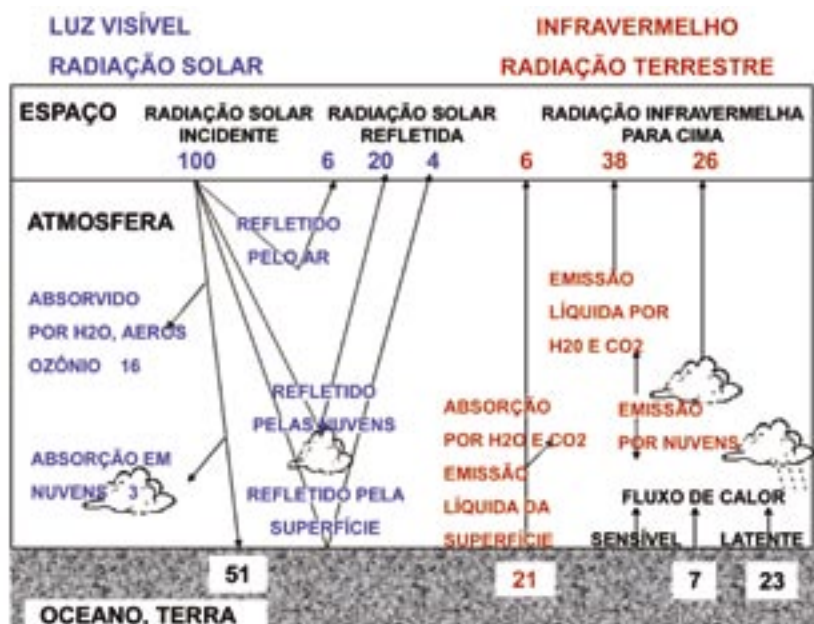
Painel Intergovernamental em Mudanças do Clima (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change), um organismo internacional que se dedica à análise do futuro climático do planeta, prevê aumentos da ordem de 2 a 5 graus Celsius nos próximos cem anos. Uma pergunta que vem à mente é: como é que são feitas essas previsões? Outra questão é se essas mudanças vão ocorrer de forma homogênea na Terra toda.

Os métodos científicos para gerar cenários de climas futuros se baseiam na evolução da meteorologia como ciência e numa grande evolução tecnológica com aplicações no monitoramento do meio ambiente. Prever o tempo nos próximos dias é a base para prever o clima daqui a dez décadas. Os últimos trinta anos viram uma revolução na nossa capacidade de prever o tempo em função de dois fatores: os satélites e os computadores. Os primeiros, desenvolvidos a partir da década de 1960, e os segundos, iniciando-se no fim da década de 1940. O ar é um fluido gasoso que, como a água, é regido pelas leis da física, em específico, da mecânica dos fluidos. O

ar, uma mistura de gases, contém água na fase gasosa e, às vezes, nas fases líquida e sólida. As mudanças de fase da água são uma particularidade de nossa atmosfera e são governadas pela primeira e segunda leis da termodinâmica. A atmosfera funciona como uma máquina térmica, eternamente circulando o ar entre os trópicos quentes e os pólos frios, passando pelas latitudes médias, na forma de células de circulação e frentes frias e quentes, e, com isso, provocando as instabilidades do tempo, que conhecemos nas formas de chuvas e ventanias.

As leis da mecânica dos fluidos e da termodinâmica usam o passado e o presente para prever o futuro, dadas algumas condições de contorno, como a cobertura da superfície – água, floresta, deserto, entre outras. O Sol fornece a energia para as transformações; a superfície da Terra, seja coberta por continentes ou oceanos, particulariza os efeitos. A transferência de energia na atmosfera passa pela sua capacidade de absorver e refletir energia, que é modificada segundo a composição atmosférica. Tudo se traduz em equações que são codificadas em

Balço de radiação no sistema Terra-atmosfera



software de previsão numérica para rodar em computadores cada vez mais eficientes. As condições presentes, as condições iniciais para a previsão do futuro, são dadas por observações do estado da atmosfera, temperatura, umidade, pressão, velocidade e direção dos ventos, e da superfície da Terra, que podem ser observações diretas, *in situ*, ou obtidas através dos imageadores a bordo de satélites, denominados de sensoriamento remoto. O grande avanço no desempenho da previsão numérica do tempo, em particular no hemisfério sul, está na capacidade de transformar imagens digitais de satélites meteorológicos obtidas em diferentes comprimentos de onda – visível, infravermelho e microondas –, em dados sobre a estrutura térmica e dinâmica da atmosfera.

A primeira extensão da previsão de tempo é a denominada previsão climática sazonal. Nesse caso, o *software* de previsão é rodado para vários meses, tendo como principal característica o grande impacto da evolução dos oceanos na evolução atmosférica por meio da temperatura da superfície do mar.

Os cenários dos climas futuros são mais um passo, agora uma extensão da previsão climática sazonal. Nesse caso, não é possível considerar a atmosfera isoladamente. É preciso incluir a dinâmica dos oceanos, com a evolução do gelo marítimo, e a dinâmica da vegetação. A principal característica que permite realizar uma integração diferenciada para o futuro é a composição atmosférica em termos de gases de efeito estufa, particularmente o gás carbônico e outros, como o metano e o óxido nítrico, por exemplo. Diferentes cenários são construídos pelo IPCC em função de diferentes emissões de gases associados às atividades humanas, envolvendo peculiaridades da matriz energética, do uso da terra, da regulamentação e fiscalização de atividades poluentes e da disposição da sociedade de se adaptar a mais ou menos restrições em termos de uso dos recursos naturais.

Para rodar uma previsão de tempo de poucos dias sobre o globo terrestre, os grandes centros de previsão de tempo global utilizam supercomputadores e gastam uma

ou duas horas, com um detalhamento da ordem de 50 km. Para fazer uma previsão de cem anos, o cenário de clima futuro, os supercomputadores atuais levam várias semanas, com detalhamentos de 200 ou 300 quilômetros, e geram uma quantidade enorme de informações digitais. O primeiro processamento a ser feito é uma média global que sintetiza o resultado de forma evidente. Aquecimentos de 1 a 5 graus Celsius em cem anos são típicos desse tipo de simulação, um valor médio global, associado a diferentes cenários de emissões de gases.

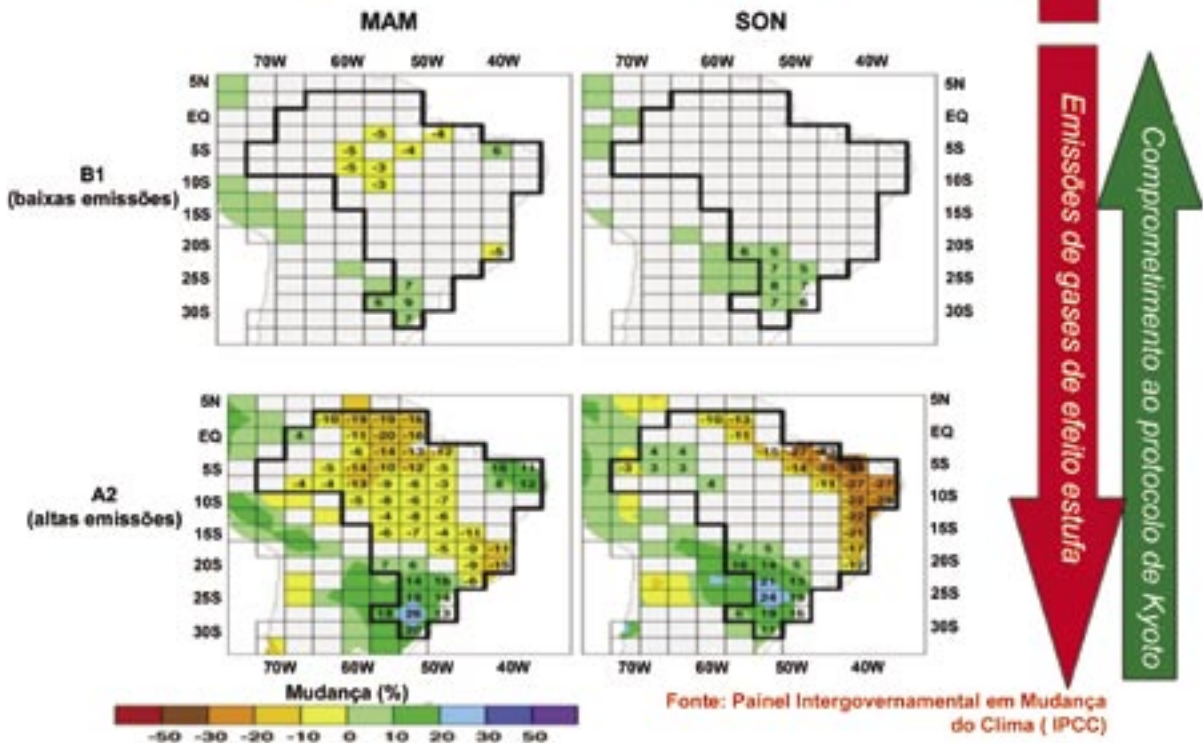
O *software* de previsão numérica de tempo e clima não é único. Diferentes centros nos diferentes países usam suas próprias versões, com suas peculiaridades, a forma de incluir as interações com a superfície terrestre, a ocorrência da mudança de fase da água e a formação de chuva. Assim, ao fazer os cenários de climas futuros, os diferentes *softwares* de previsão produzem projeções futuras médias globais bastante semelhantes no todo, mas com características regionais contrastantes. Além de diferenças na temperatura, mais quente ou mais fria que a média global, existem diferenças marcantes no ciclo hidrológico, regiões mais secas ou mais chuvosas para as diversas estações do ano.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS OU VARIABILIDADE CLIMÁTICA

Cada vez que ocorre um evento extremo como chuvas fortes, ventos fortes ou furacões, surge a questão: será esse um indício das mudanças climáticas?

A análise das séries históricas de temperatura e chuva em algumas regiões do mundo parece indicar que está ocorrendo uma alteração no comportamento do clima. Médias móveis de cinco a dez anos mostram algumas tendências que chamam a atenção mas que nem sempre podem ser consideradas como provas conclusivas de alterações permanentes do clima.

Mudanças Climáticas Mudanças na chuva no Brasil para o ano 2050



Fonte: Painel Intergovernamental em Mudança do Clima (IPCC)

Um exemplo ocorre com a chuva da região amazônica: estudos indicam que a metade norte e a metade sul dessa região têm o total anual de chuva variando de forma oposta ao longo das últimas sete ou oito décadas indicando uma variação de longo prazo que tem sido associada à lenta evolução da temperatura da superfície do Oceano Atlântico tropical. As correntes superficiais marítimas no Atlântico fazem parte de um imenso cinturão que se estende do hemisfério sul até o norte e retorna em águas profundas, controlando a evolução de longo prazo do clima nas regiões continentais próximas

Na região do Pacífico, a temperatura da superfície do mar apresenta um fenômeno marcante que é o El Niño, associado ao aquecimento das águas equatoriais. O El Niño, assim como o La Niña, que é o resfriamento anormal dessa mesma região, ocorre de forma irregular a cada 2-4 anos

e é responsável por alteração no clima da Terra toda. Em particular na América do Sul, os efeitos típicos do El Niño são secas na região leste da Amazônia e no Nordeste do Brasil e chuvas na região Sul. Os efeitos do El Niño/La Niña são considerados naturais. No entanto, as correntes marítimas, assim como a temperatura das águas dos oceanos Pacífico e Atlântico, podem também estar sendo lentamente alteradas pelo efeito estufa, com conseqüências no clima global.

Grandes regiões urbanas como a cidade de São Paulo também passaram por um gradual aquecimento à medida que a área urbana foi crescendo e o asfalto e o concreto passaram a reter mais calor quando comparadas com as regiões rurais. No caso de São Paulo, entre os principais efeitos observados nas séries históricas de chuva estão a diminuição das chuvas fracas, os chuviscos e a garoa, e o aumento da frequência de ocorrência de chuvas fortes, as

tempestades. Essa mudança de clima local é considerada numa outra categoria daquela provocada pelo efeito estufa pois o efeito se dilui com a distância do centro urbano.

Um outro efeito local ou regional se observa quando ocorre uma mudança no uso da terra. Ao longo da história de nossa civilização, grandes áreas continentais passaram por substanciais mudanças associadas ao avanço da agricultura sobre regiões originalmente cobertas por florestas ou vegetação nativa. O principal efeito da troca de vegetação é um aquecimento da região, principalmente na estação seca. As árvores têm raízes profundas e conseguem transpirar vapor d'água para a atmosfera, e assim resfriá-la, em boa parte, se não na totalidade, da estação seca. A transpiração mantém o ar mais úmido e fresco quando comparado com regiões com vegetação rasa ou solo nu, típicos de culturas anuais ou pastagens. Quando essa substituição da cobertura vegetal ocorre em grandes regiões continentais, o efeito pode ser considerável.

Além do efeito direto da mudança do uso da terra, existe um outro impacto que é a conversão do carbono estocado na madeira para carbono atmosférico, seja pela queima da madeira ou pela sua decomposição orgânica. Parte do carbono transferido para o ar é absorvida pelos oceanos ou pela própria vegetação em crescimento, enquanto o que sobra contribui para o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

A poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis fósseis pelos veículos, assim como as emissões em processos industriais afetam diretamente a concentração de gases na atmosfera, além de provocar alterações climáticas regionais. Um efeito extremo ocorre em regiões onde há queima de biomassa, como na região Centro-Oeste do Brasil no fim da estação seca, onde há tanta fumaça no ar que a visibilidade é reduzida com impactos no tráfego aéreo (operações de pouso e decolagem visual) e na saúde (doenças respiratórias). Estudos mostram que a temperatura do ar pode se reduzir em 2 ou 3 graus Celsius em condições de muita fumaça.

O EFEITO ESTUFA

Entender como ocorre o efeito estufa, assim como a complexidade envolvida, passa por entender como ocorre o balanço de energia na atmosfera. Isso significa observar quanta energia está envolvida nos diferentes processos e fechar a conta geral baseando-se no princípio de que não há perdas ou ganhos de energia no sistema Terra-atmosfera, como um todo, com relação à energia recebida do Sol.

Para cada 100 unidades de radiação solar chegando ao longo de um ano, no topo da atmosfera, ocorre uma distribuição pelos diversos processos de absorção, reflexão e transmissão de radiação. O vapor d'água é um grande absorvedor de radiação infravermelha e, juntamente com o gás carbônico, é o principal responsável pela retenção de boa parte da radiação emitida pela Terra, o que constitui o chamado efeito estufa. A analogia é com uma estufa para plantas coberta com um teto de vidro que deixa entrar a luz solar mas não deixa sair o calor, ou seja, a radiação infravermelha. A atmosfera funciona de forma semelhante também deixando passar a maior parte da luz solar e retendo boa parte da radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra. Outros gases importantes para quantificar o efeito estufa são o metano e o óxido nitroso, envolvidos em processos biogeoquímicos na superfície terrestre. Um caso especial é o ozônio que está presente na estratosfera devido a reações químicas associadas à absorção de radiação ultravioleta em comprimentos de ondas muito curtos. Sua concentração varia com as estações do ano e com a região geográfica, tendo valores altos sobre as regiões polares. A diminuição de concentração desse gás na estratosfera das regiões polares tem sido apontada como um dos efeitos da ação do homem sobre a natureza – no caso, por meio do composto CFC, utilizado durante décadas nos sistemas de refrigeração e que consome o ozônio através de uma série de reações fotoquímicas. Com a redução da concentração do ozônio estratosférico forma-se o chamado buraco de ozônio e ocorre a entrada de mais radiação ultravioleta

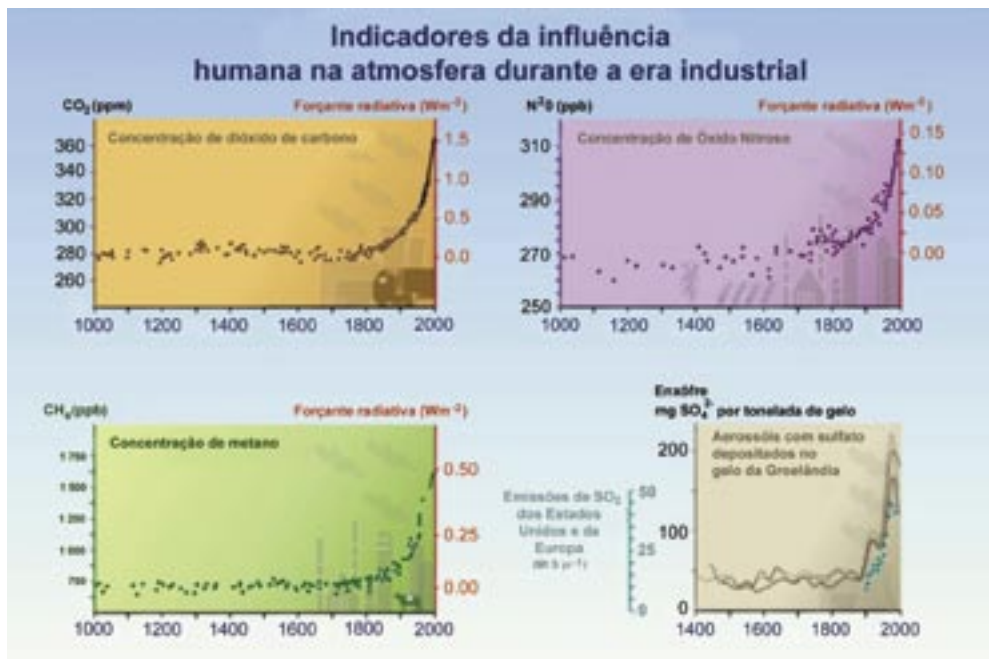
até a superfície. Apesar de o efeito global de aquecimento/resfriamento associado a esse gás ser muito pequeno quando comparado com os demais, os danos à saúde não podem ser desprezados, principalmente no caso de doenças da pele.

O ozônio aparece também na troposfera como subproduto de reações disparadas pelas emissões veiculares e industriais e da queima de biomassa. Nesse caso, novamente o efeito é direto na saúde humana, principalmente com danos ao sistema respiratório, assim como na vegetação em geral impactando sua produtividade. No entanto, a consequência do ozônio troposférico no efeito estufa também é pequena.

As nuvens têm um papel fundamental na dimensão do efeito estufa. A radiação solar sofre intensa reflexão ao encontrar uma nuvem, que nada mais é que um conjunto de gotículas de água líquida e/ou pedrinhas de gelo. Uma nuvem se forma a partir de movimentos do ar para cima. Esses movimentos podem ser causados pelo aquecimento da superfície em dias ensolarados ou pelo encontro de ventos com direções diferentes, como no caso das proximidades das frentes frias e quentes. Quanto mais vapor d'água estiver

presente no ar, maior sua capacidade de formar uma nuvem que produza chuva. As regiões equatoriais e tropicais da Terra contêm mais vapor d'água na atmosfera do que as regiões polares e de latitudes médias e, assim, têm maior capacidade de gerar chuvas abundantes. Além disso, quanto mais quente a atmosfera, maior a sua capacidade de reter vapor d'água, um dos principais gases de efeito estufa. Ou seja, com o aquecimento global, uma maior quantidade de vapor d'água deve estar presente na atmosfera, intensificando ainda mais o efeito estufa e o ciclo hidrológico na forma de chuvas extremas.

Qualquer pequena alteração na área coberta por nuvens tem um impacto significativo no balanço de energia. Por exemplo, no caso de aumento de chuvas, o efeito na temperatura do ar pode ser de resfriamento pela maior quantidade de nuvens presentes refletindo de volta para o espaço boa parte da radiação incidente que fica indisponível para aquecer o ar. Por outro lado, no caso de diminuição de chuvas e da cobertura de nuvens, o efeito de aquecimento pode ser muito maior que o devido apenas ao aquecimento global causado pelo efeito estufa.



Fonte: Painel Intergovernamental em Mudança do Clima (IPCC)

Os aerossóis também têm efeito marcante. Aerossóis formados por sulfatos têm uma grande capacidade de refletir radiação solar e portanto seu efeito na temperatura do ar é de um resfriamento. Os sulfatos são encontrados em regiões com poluição contendo enxofre, em regiões em que ocorre decomposição de matéria orgânica e em regiões marítimas, nas quais são produzidos a partir do sal marinho esborrifado no ar com a quebra das ondas. Aerossóis constituídos por carbono originado da queima de biomassa, por exemplo, têm características absorvedoras e podem alterar a condição térmica da camada onde se encontram, com conseqüências na capacidade de a atmosfera formar ou não as nuvens de chuva.

A superfície da Terra mais brilhante ou menos brilhante, refletindo mais ou menos radiação solar, também afeta a capacidade de evaporar água, de realizar fotossíntese e de aquecimento dessa superfície, tendo um impacto também na formação de nuvens. Uma floresta tropical como a amazônica tem cor verde-escura, enquanto uma pastagem degradada tem cor verde-clara. Essa pequena diferença de cor – e, portanto, da capacidade de refletir – faz com que a energia disponível seja diferente nas duas superfícies, contribuindo para alterações no clima local em cada uma dessas regiões em termos de temperatura e de chuva.

A fotossíntese e a respiração das plantas e do solo são a base dos processos de interação biosfera-atmosfera envolvendo trocas de carbono. Numa situação de equilíbrio, o carbono consumido durante o dia para realizar fotossíntese é devolvido à atmosfera, à noite, na forma de respiração. No entanto,

essa situação de equilíbrio praticamente não existe. Condições atmosféricas mais quentes ou mais frias, mais úmidas ou mais secas, e com maior ou menor quantidade de gás carbônico, alteram a taxa de fotossíntese e de respiração deixando um saldo positivo ou negativo ao longo de períodos anuais. A floresta amazônica é um exemplo em que diferentes sub-regiões se comportam de forma diferente com relação ao saldo do balanço de carbono.

Quantificar todas essas relações entre a biosfera e a atmosfera, os impactos positivos e negativos de cada um dos processos físico-químicos e biogeoquímicos é o que torna complexo o problema, necessitando de uma abordagem de simulação numérica como a usada na previsão de tempo e clima. Essas simulações numéricas, no entanto, ainda não são perfeitas. Simular o passado e o presente é a forma de verificar o realismo das simulações e, embora tenha havido avanços imensos nas últimas três décadas, ainda há detalhes que desafiam nossa capacidade de simulação. Exemplos são o efeito dos aerossóis na microestrutura das nuvens e na sua capacidade de gerar chuva, as interações do ozônio com os ecossistemas e o impacto no balanço de carbono, as interações biogeoquímicas entre atmosfera e oceanos, entre tantos outros.

As pesquisas na área de mudanças climáticas têm uma característica multidisciplinar que faz com que o progresso científico só seja conseguido com uma visão abrangente das complexidades do problema. Ensinar as ciências da Terra com essa visão é um dos grandes desafios de nossos tempos.