Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Consequências das rápidas mudanças ambientais no Ártico

Enoil de Souza Júnior¹, Jefferson Cardia Simões², Kátia Kellem da Rosa³ Centro Polar e Climático – UFRGS ¹Mestre em Geografia, pesquisador do Centro Polar e Climático. Autor correspondente: E-mail: enoil.junior@ufrgs.br ²Professor titular de Geografia da UFRGS, Diretor científico do Centro Polar e Climático ³Professora de Geografia da UFRGS, vice-diretora do Centro Polar e Climático

Artigo recebido em 13/06/2016 e aceito em 03/08/2016

RESUMO

Este artigo analisa as mudanças ambientais que ocorreram no Ártico ao longo das últimas cinco décadas. O estudo foi realizado pela coleta de dados em artigos científicos, livros e também relatórios de ONGs associadas a questão ártica. Durante os últimos 50 anos, o Ártico mostrou a mais rápida aquecimento no Planeta, duas vezes mais que a média mundial, isso causou rápidas mudanças ambientais, como a redução do volume das geleiras, o que contribuiu para o aumento do nível médio dos mares; o degelo do permafrost, que libera grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) na atmosfera, intensificando o efeito estufa; a migração da vegetação em direção ao Norte, alterando a disponibilidade de alimentos e os padrões de migração dos animais; o aumento da temperatura da superfície do mar, o que pode causar a migração de cardumes de peixes para áreas mais ao Norte. A mudança mais rápida, e a que mais chama a atenção, é a drástica redução da área coberta por gelo marinho no verão. O Ártico é o sinalizador do impacto das mudanças climáticas de origem antrópica e caminha, rapidamente, para se tornar um ambiente diferente daquele conhecido desde as grandes descobertas. Em poucas décadas não haverá gelo marinho no verão, causando claras mudanças no ambiente físico e com consequências graves para a biota.

Palavras-chave: Ártico, Gelo Marinho, Mudanças Climáticas, Geografia Polar.

Consequences of rapid environmental changes in the Arctic

ABSTRACT

This article analyses the environmental changes that have occurred in the Arctic over the past five decades. The study was conducted by collecting data in scientific papers, books and also NGOs reports associate with the Arctic issue. During the past 50 years, the Arctic showed the fastest warming on the planet, more than twice the world average, it caused rapid environmental changes, such as reducing the volume of glaciers, which contributed to the increase in the mean sea level; the melting of permafrost, which releases large amounts of carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) into the atmosphere, enhancing the greenhouse effect; migration of vegetation towards the north, changing the availability of food and animal migration patterns; increasing sea surface temperature, which can cause migration of fish shoals in areas further north. The fastest change, the one that draws the most attention, is the drastic reduction in the area covered by sea ice in the summer. The Arctic is a climate change beacon because of anthropogenic and walks quickly to become a different environment from the time known from the great discoveries. In a few decades there will be no sea ice in the summer, causing clear changes in the physical environment and with serious consequences for the biota.

Keywords: Arctic, Sea ice, Climate Change, Polar Geography.

Introdução

O Ártico é a região da Terra que registrou o maior aquecimento atmosférico ao longo dos últimos 50 anos (Figura 1), o aumento da temperatura média anual na região é em grande parte atribuído ao aquecimento global, devido a intensificação antrópica do efeito estufa (IPCC, 2013). Esse aquecimento do Ártico tem causado

rápidas mudanças ambientais como, por exemplo, redução na extensão e espessura do gelo marinho, redução da cobertura de neve e também mudanças na extensão do permafrost (o solo permanentemente congelado), atingindo diretamente a biota polar (e.g., reduzindo áreas de migração e alimentação do urso-polar (*Ursus maritimus*) e da raposa-do-ártico (*Alopex lagopus*)).

As mensurações com satélites mostram um decréscimo de 30% na extensão de gelo marinho no mês de setembro, o mês que marca o fim do período de seu derretimento. Ao longo dos últimos 5 anos, a extensão mínima do gelo marinho no verão não ultrapassou 5,1 milhões de km², enquanto antes, na década de 1990, ultrapassava 7 milhões de km². Simultaneamente, parte do manto de gelo da Groenlândia e geleiras nas ilhas árticas

do Canadá, em Svalbard e ilhas árticas siberianas estão retraindo (NSIDC, 2014).

Observa-se na Figura 1 que o Ártico está, em grande parte, na cor vermelha, o que indica que o aumento na temperatura atmosférica superficial foi maior do que 2°C durante esses 50 anos, superior ao observado em outras partes da Terra. A inserção mostra a tendência do aumento da temperatura ao longo do período por latitude.

Fonte: NASA GISS, 2014

Figura 1- Tendência da temperatura média anual do ar durante o período 1960–2011.

Material e métodos

Para a realização deste trabalho foi utilizado o método do estudo de caso, com abordagem dedutiva. O estudo de caso se propõe a máxima coleta de dados possíveis, pois busca analisar o fenômeno por diversos enfoques, é isto que esta pesquisa pretendeu realizar, ou seja, ao analisar as rápidas mudanças ambientais no Ártico.

O estudo incluiu uma revisão bibliográfica sobre o quadro de mudanças ambientais no Ártico baseada nos relatórios do Conselho Ártico (*Arctic Council*, <http://www.arctic-council.org/index.php/en/>), além de agências de monitoramento ambiental como NSIDC (*National Snow and Ice Data Center*), NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), etc. Os dados retração do gelo marinho foram coletados no sítio do NSIDC para o período 1979–2015, e artigos científicos sobre mudanças climáticas.

A discussão foi elaborada a partir da síntese dos dados, levando-se em conta as implicações ambientais ocorridas nas últimas décadas.

Resultados e discussão

Temperatura superficial do ar

A Figura 2 mostra a variação da temperatura média superficial do ar ártico desde que essa passou a ser mensurada a partir de 1880. A partir de 2005 registram-se as mais altas médias. A temperatura média anual superficial do ar no período 2005–2012 da região ártica foi cerca de 1,5°C ou maior quando comparado a normal 1961–1990, sendo inclusive mais altas que do período de aquecimento acelerado entre 1930 e 1940. Desde 1980, a temperatura média superficial no Ártico aumentou duas vezes mais rápida do que à média global (AMAP, 2012).

Figura 2- Desvio da normal da temperatura do ar à superfície entre 1961–1990 (°C). Fonte: AMAP, 2012.

De acordo com AMAP (2012), ao longo dos últimos dois mil anos a temperatura do ar no Ártico apresentou tendência de decréscimo até o início do século XX (Figura 3). Essa reconstrução paleoclimática foi baseada em dados de dendrocronologia (registros de anéis de árvores), testemunhos de gelo da Groenlândia, sedimentos de fundo de lagos e o cruzamento com dados instrumentais de estações meteorológicas. Os dados meteorológicos mostram o aumento da temperatura do ar ao longo do século XX, intensificado nos últimos 20 anos.

No entanto, as mudanças de temperaturas não foram uniformes ao longo dos anos, o aquecimento atmosférico foi maior no outono e começo do inverno. No Alasca, e no oeste do

Canadá, as temperaturas inverniais subiram entre 3 e 4°C nos últimos 50 anos (ACIA, 2004). Serreze, Holland e Stroeve (2007) relatam que esse aumento no outono e inverno ocorre por causa da escala temporal da troca de calor entre oceano e atmosfera, uma vez que o primeiro começa a irradiar energia de volta para a atmosfera depois do verão.

Na Figura 3 pode-se ainda observar o resfriamento ártico em torno de 0,3°C até o início do século XX, associado ao fim da Pequena Idade do Gelo, período de esfriamento climático que atingiu principalmente o Hemisfério Norte, entre 1300 e 1850 d.C. Após a década de 1920, o Ártico rapidamente aquece (1,5°C em menos de 100 anos).

Fonte: AMAP, 2012.

Figura 3- Reconstrução paleoclimática da temperatura média superficial do ar no Ártico ao longo dos últimos dois mil anos feita a partir de fontes indiretas (em azul) como anéis de árvores, testemunhos de gelo e

sedimentos lacustres. A linha vermelha representa as temperaturas observadas, a partir de 1880, por dados instrumentais.

Gelo marinho: um indicador chave

O gelo marinho é um indicador e também um ator de mudanças climáticas, atua diretamente sobre a superfície reflexiva (albedo), cobertura de nuvens, umidade e troca de calor entre superfície e a atmosfera. O gelo marinho tem importante papel ambiental, econômico e também social (ACIA, 2004; Kwok, 2010).

De acordo com a definição do NSIDC (2015), o gelo marinho é altamente sensível às mudanças de temperatura do ar e do oceano. Esse gelo tem um comportamento sazonal bem marcado, no inverno ele ocupa uma área maior e na primavera e verão, ele derrete parcialmente, recongelando novamente no outono e inverno.

Para Kwok e Untersteiner (2011) e NSIDC (2015), o gelo marinho é importante para o balanço de energia global. Grande parte da energia recebida pelo Ártico é refletido de volta para espaço pelo gelo e neve. Esse papel ambiental do gelo marinho é significativamente importante para a manutenção do clima em nosso planeta. Por isso, a redução na extensão da cobertura de gelo marinho nas regiões

polares afeta o fortemente o clima planetário, pois permite que o oceano aberto absorva uma quantidade maior de energia.

A extensão do gelo marinho recuou sensivelmente, principalmente no verão (Figura 4) devido a esse aquecimento atmosférico. Em 2012 ocorreu o recorde de menor extensão do gelo marinho desde que começaram as mensurações com satélites em 1979.

Essa mínima extensão (3,41 milhões de km²) foi 49% inferior à média de setembro do período 1979–2000 (6,71 milhões de km²). Também em 2012 registrou-se a maior taxa de perda de gelo marinho desde o início das mensurações por satélite (11,83 milhões de km²). Para Perovich *et al.* (2015), também existe tendência de redução da extensão máxima de gelo marinho (março), um decréscimo de 2,6% por década, enquanto para a extensão mínima (setembro) a redução foi de 13% por década, ambas taxas relativas às médias do período 1979–2000.

Fonte: NSIDC, 2015.

Figura 4- A) Média da extensão da cobertura de gelo marinho no mês de março (inverno), no período 1979–2014. B) Média da extensão do gelo marinho no mês setembro (verão), no período 1979–2014. Note o recorde da menor extensão em 2012 (uma cobertura de gelo de somente 3,41 milhões de quilômetros quadrados).

A diminuição da área do gelo marinho provoca mudanças no balanço de energia. Com

uma menor área de alta reflexão, a energia será, principalmente, absorvida pela superfície do oceano. Esse processo gera um retroprocessamento

positivo e faz as temperaturas subirem ainda mais (Perovich *et al.*, 2007; NSIDC, 2015). Modelos climáticos indicam um Ártico livre de gelo no verão já por volta de 2030 ou 2040 (Kerr, 2012).

Mudanças no Oceano Ártico

O Oceano Ártico (OA) é um oceano mediterrâneo, ou seja, cercado por continentes, ligado ao Oceano Pacífico pelo estreito de Bering e ao Oceano Atlântico pelo mar da Noruega e da Groenlândia (Brown *et al.*, 1989).

As correntes superficiais no Ártico foram inicialmente deduzidas a partir do movimento do gelo marinho. Depois boias fixadas no gelo começaram a ser monitoradas via satélite, porém ainda havia a dificuldade de compreender se o movimento era causado pelas correntes marítimas ou pelo vento (Brown *et al.*, 1989).

A circulação oceânica é centrada na bacia canadense e gira no sentido horário, com o principal escoamento sendo pela corrente oriental da Groenlândia, que carrega parte do gelo marinho e icebergs em direção ao Sul ao longo dessa costa e quando ela encontra a corrente Irminger, relativamente mais quente, inicia o degelo (Brown *et al.*, 1989). Davis (2000) destaca que 70% do volume de água que entra e sai do OA é via o estreito de Fram, entre o norte da Groenlândia e o arquipélago de Svalbard.

O Oceano Ártico também recebe um ramo da corrente do Golfo, chamada de corrente do Atlântico Norte (ou deriva do Atlântico Norte) e que flui ao longo da costa da Noruega e segue seu caminho até o OA. Ao penetrar no OA via estreito de Fram, essa corrente recebe o nome de Spitsbergen Ocidental, estima-se que 60% das águas que adentram o OA sejam provenientes da corrente do Golfo (Elverland, 2009).

O estreito de Fram é uma via arterial de grande importância para o OA. Fluxos de água quente vindas do Atlântico fluem ao Norte ao longo da costa ocidental de Svalbard, e fluxos de água fria fluem para ao Sul, ao longo da costa oriental da Groenlândia, e também através do mar de Barents ao longo da costa oriental de Svalbard (Elverland, 2009).

É no Ártico que se forma parte das correntes de fundo dos oceanos, a circulação termohalina global exerce um importante papel na temperatura dos oceanos e influencia a clima

global (Davis, 2000). As correntes de fundo se formam por aumento na densidade, isso corre por resfriamento da água, excesso de evaporação sobre precipitação e/ou formação de gelo marinho. Esse gelo ao se formar expulsa o sal, fazendo que as águas subjacentes fiquem mais salinas (Schmiegelow, 2004) e, portanto, mais densas.

O aumento de densidade faz com as águas afundem, num movimento vertical, em direção ao assoalho oceânico, podendo ocupar profundidades intermediárias ou de fundo. Depois desse fluxo vertical, seguem o trajeto horizontal, com as águas recém formadas empurrando as massas mais antigas (Schmiegelow, 2004).

Davis (2000) destaca a preocupação da comunidade científica quanto a redução ou cessamento na formação da termohalina devido as mudanças climáticas, o que teria impacto na circulação global. Ainda, ele destaca que a formação da corrente de fundo do Atlântico é muito importante para a circulação global e que tem o papel de defletir a corrente do Golfo em direção ao norte da Europa. A interrupção desse mecanismo pode aquecer ainda mais o OA, pois a corrente pode penetrar mais ao Norte, esfriando o norte da Europa.

Outro papel importante das correntes de fundo é o sequestro de carbono da atmosfera, modelos sugerem que mudanças na formação da termohalina podem ter impactos na temperatura do ar, padrão de precipitação e nível do mar, afetando a população que vive próximas ao Atlântico Norte (Srokosz *et al.*, 2012). A região do mar da Groenlândia é importante para oceanografia, pois ali nos meses de inverno se forma a AMOC, célula de revolvimento meridional da circulação global (Atlantic Meridional Overturning Circulation), essa corrente convectiva afunda até profundidades de 1500–2000 metros, ela renova as águas de fundo, ao fazer o deslocamento vertical ela sequestra CO₂ da atmosfera, limitando o aumento do nível desse gás na atmosfera (Davis, 2000).

Com a acentuada diminuição da área do gelo marinho, as águas nas bordas do OA têm apresentado temperaturas muito superiores àquelas historicamente apresentadas. Naturalmente, por conta das correntes e ventos, algumas áreas apresentam anomalias positivas e outras negativas. Porém no verão de 2013, havia poucas áreas com anomalias negativas (Figura 5) (NOAA, 2015).

Figura 5: Anomalias de temperatura na superfície do Oceano Ártico no ano de 2013, em relação à média 1982–2006. Fonte: NOAA, 2013.

Da mesma maneira que as temperaturas do ar apresentam anomalias positivas, o OA também apresenta temperaturas superficiais superiores à média, principalmente nos mares de Barents e Kara. Com a diminuição da cobertura de gelo, o oceano passa a absorver a energia que antes era irradiada para o espaço. Christopherson (2012) ressalta que o gelo marinho tem albedo de até 90%, enquanto a capacidade reflexiva do oceano é de até 10%. Essa diferença no balanço de energia no Hemisfério Norte provoca diversos tipos de mudanças ambientais, entre elas o retroprocessamento positivo do aquecimento do oceano. Um OA mais quente favorece a retração do

gelo marinho, que, por sua vez, faz com que o oceano receba mais energia.

O derretimento das geleiras continentais pode afetar a circulação das correntes no OA, ao aportar grande volume de água doce. Água do descongelamento do permafrost também flui para o OA. As principais fontes de água doce são a chuva, neve e derretimento das geleiras da Groenlândia, estima-se que o OA tenha recebido 7.700 km³ de água doce nos últimos 10 anos, isso afeta a formação das correntes, pois a água doce muda a salinidade, prejudicando a formação da AMOC (AMAP, 2011).

Mudanças no permafrost

Permafrost é o solo permanentemente congelado, ou seja, para receber esse nome o solo deve permanecer com temperatura de 0°C ou inferior por dois anos seguidos. O conceito de permafrost tem relação unicamente com a temperatura apresentada pelo solo e não pela presença de água ou o tipo de solo (Christopherson, 2012).

O permafrost ocorre em 24% da superfície terrestre exposta no Hemisfério Norte e, de acordo com Bockheim (2015), 99% desse total ocorre no Hemisfério Norte (Figura 6). A distribuição do permafrost é controlada basicamente pela temperatura do ar, mas também pela espessura da neve, vegetação, orientação solar e propriedades do solo. A maior parte do permafrost encontrado hoje

é remanescente da última idade do gelo (UNEP, 2012).

A distribuição do permafrost é classificada em três tipos: contínuo, descontínuo e esporádico (UNEP, 2012; Bockheim, 2015). No Ártico, o permafrost contínuo ocorre nas regiões mais frias, em direção ao polo geográfico, aproximadamente a partir da isoterma de temperatura anual média de -7°C, a espessura do solo congelado pode ultrapassar 1000 metros de profundidade, incluindo o solo propriamente dito e a rocha inalterada subjacente, e apresenta uma espessura média de 400 metros. Já os bolsões de permafrost descontínuo não estão ligados e ele se torna esporádico em direção ao equador até desaparecer (Christopherson, 2012).

Figura 6: Distribuição do terreno permanentemente congelado no Hemisfério Norte, dividido em zonas de permafrost contínuo, descontínuo e esporádico. Fonte: International Permafrost Association, 1998.

Na sessão vertical tem-se três camadas distintas, a mais próxima da superfície é a camada ativa. Essa camada descongela no verão e volta a congelar no inverno. O aumento das temperaturas

superficiais do ar faz aumentar a espessura da camada ativa e, conseqüentemente, reduz a espessura do permafrost. Abaixo da camada ativa encontra-se a zona de transição e a camada que

efetivamente não descongela no verão (UNEP, 2012).

As temperaturas do permafrost aumentaram na maioria das regiões ao redor do mundo desde o início da década de 1980. Essa tendência responde ao aumento da temperatura superficial do ar, a mudanças na sua espessura e, ainda, no tempo de permanência da neve (IPCC, 2013). O aquecimento do Ártico pode resultar no descongelamento de 30 a 85% do permafrost até 2100. Isso causará mudanças na hidrologia, aumentará a frequência de incêndios e erosão. Estima-se também que ocorrerá o aumento do número de zonas úmidas e lagos nas áreas de permafrost contínuo e diminuição nas áreas do permafrost descontínuo (UNEP, 2012).

De acordo com Spencer *et al.* (2015), o descongelamento da camada ativa tem dois efeitos imediatos. No primeiro momento a matéria orgânica congelada nas camadas superiores do solo derrete, ficando exposta à ação microbiana, a decomposição da matéria orgânica pode liberar dióxido de carbono e metano para atmosfera. Os organismos unicelulares devoram o antigo carbono que agora é liberado pelo descongelamento do solo e com isso liberam dióxido de carbono de volta para atmosfera e que acabam por intensificar mais ainda o efeito estufa, ou seja, um caso clássico de retroprocessamento positivo.

No segundo momento, o gelo que estava contido nas camadas superiores torna-se líquido, algumas vezes o solo pode conter bastante quantidade de água em forma de lentes, veios e cunhas. Essa água percola no solo de forma não uniforme, criando uma superfície caótica com pequenas elevações e depressões saturadas com água, esse tipo de superfície é conhecido como terreno termocarste. O termocarste pode prejudicar a infraestrutura de estradas, casas, aeroportos, comprometendo as comunidades que vivem no Ártico (U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force, 2003).

Uma projeção feita por Larsen *et al.* (2008) aponta um aumento nos gastos públicos no reparo da infraestrutura pública, rodovias, portos, aeroportos, pontes e outros no estado do Alasca (EUA) por conta dos efeitos das mudanças climáticas, como ocorrência de termocarste, erosões e inundações. O estudo projeta gastos na ordem 10 a 20% a mais para o período 2006–2030 e 10% para 2006–2080, o que representa entre 3,6 e 6,1 bilhões de dólares americanos para o primeiro período e entre 5,6 e 7,6 bilhões de dólares para o segundo.

O permafrost é um grande armazenador de dióxido de carbono (CO₂), contendo aproximadamente 1700 gigatoneladas (Gt) de

carbono na forma de matéria orgânica congelada, o que seria duas vezes mais CO₂ do que se encontra hoje na atmosfera. As emissões de CO₂ e metano (CH₄) causadas pelo descongelamento do solo podem amplificar o aquecimento, causando um retroprocessamento positivo. Estima-se que até 2100 será liberado na atmosfera entre 43 e 135 Gt e até 2200 entre 246 e 541 Gt de CO₂ (UNEP, 2012).

Mudanças na cobertura de neve

Observações diárias da espessura e quantidade de neve precipitada são feitas desde meados do século XIX em vários países como Suíça, EUA, Finlândia e a antiga União Soviética. Porém, somente a partir de 1966 houve monitoramento em escala global, feito por satélites, da cobertura de neve (IPCC, 2013). A neve é monitorada de diversas formas: o número de dias sobre o solo (duração), a área coberta (extensão) e quantidade (espessura). A duração e a extensão podem ser monitoradas via satélite, porém a espessura só pode ser mensurada *in situ*, o que eleva o grau de incerteza (AMAP, 2011), pois não existe uma rede de monitoramento para toda a região ártica.

Dye (2002) ressalta que desde o início da década de 1920, e principalmente depois da década de 1970, a área coberta por neve no Hemisfério Norte está diminuindo na primavera e verão, mas não substancialmente no inverno, apesar deste estar mais quente.

Análises da extensão da área coberta por neve na primavera (abril a junho), época em que a cobertura de neve está principalmente sobre o Ártico, revela uma redução significativa nos meses de maio a junho. O mês de junho tem apresentado sucessivos recordes de menor extensão na cobertura de neve, a taxa de diminuição para o período 1979–2011 é de quase 18% por década (Derksen e Brown, 2012).

Hoag (2012) aponta para os efeitos causados pela redução da cobertura de neve, como a mudança no albedo, exposição do solo, arbustos e árvores à radiação solar que antes era refletiva pela neve, ela também relata que o permafrost também fica exposto ao mesmo efeito e isso pode alterar o calendário do escoamento d'água da primavera para os rios e adiantar o crescimento das plantas. Ainda de acordo com Hoag (2012), desde os anos 1980, a neve que permanece no Ártico após a primavera diminuiu em dois terços, de aproximadamente 9 para 3 milhões de km².

A maior redução na duração da neve ocorreu nas regiões costeiras, particularmente na costa do Alasca, norte da Escandinávia e norte do Canadá, essas áreas são mostradas em laranja e

vermelho na Figura 7. A neve está derretendo mais cedo, por causa do aumento da temperatura superficial do ar. Contudo, algumas áreas como o norte da Rússia têm recebido mais neve, isso ocorre

porque o OA nessa região está livre de gelo marinho mais cedo, assim há mais evaporação e essa umidade precipita em forma de neve (AMAP, 2011).

Figura 7- Mudança na duração da neve no outono e primavera entre 1972/73 e 2008/09. Fonte: AMAP, 2011.

A AMAP (2011) lista uma série de consequências devido a diminuição da cobertura de neve, tais como: no outono e inverno os solos se tornam mais frios onde há menos neve e mais quentes onde há mais neve; o suprimento de água de degelo é reduzido na primavera e verão, afetando banhados e a vegetação e fornecimento de água doce; a curto prazo o descongelamento mata a vegetação subjacente, afetando os animais que dependem de pastagens; mais água de degelo favorece o desenvolvimento de plantas, isso implica maior sequestro de carbono e rotas de transporte sobre a neve ficam disponíveis por menos tempo, afetando o turismo.

Mudanças na vegetação

As principais zonas de vegetação no Ártico são: o deserto polar, tundra e a parte mais ao norte da floresta boreal. No Alto Ártico predomina o deserto polar, caracterizado por áreas de solo exposto e ausência de qualquer tipo de vegetação

arbustiva. Embora a vegetação nessa área seja esparsa, é possível encontrar animais como boi almiscarado, caribus e renas. Já a tundra é caracterizada pela vegetação arbustiva rasteira (ACIA, 2004).

O aumento na temperatura superficial do ar, aliado ao descongelamento do permafrost, favorece uma vegetação mais alta e mais densa, promovendo a expansão da floresta boreal em direção à tundra ártica e da tundra em direção ao deserto polar. As mudanças na vegetação adicionadas às projeções de elevação do nível dos mares, poderá reduzir a área da tundra para a menor extensão dos últimos 21 mil anos, diminuindo a área de procriação de pássaros e áreas de pastagens. Estima-se que algumas espécies de plantas e animais mover-se-ão até 1000 quilômetros em direção Norte (ACIA, 2004).

O Ártico está se tornando mais verde, a Figura 8 mostra o resultado do monitoramento satelital utilizando a metodologia NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), um

indicador da atividade fotossintética, feita a partir da diferença entre julho de 1982 e dezembro de 2011 para o norte da América e norte da Eurásia. As áreas verdes representam o aumento da abundância de plantas, enquanto os tons de marrom representam as áreas onde a atividade fotossintética declinou, nas áreas brancas não houve tendência significativa (Earth Observatory, 2015).

A imagem apresenta que nas partes mais setentrionais do Canadá, Rússia e Escandinávia, estão crescendo arbustos e árvores, região onde previamente só havia gramíneas. Xu *et al.* (2013) concluíram que a vegetação aumentou entre 7 e 10% no período 1982–2011. Entretanto, a floresta boreal na América do Norte diminuiu sua produção fotossintética no mesmo período, isso pode ter ocorrido, por exemplo, por conta de secas, poluição, incêndios florestais e também pela indústria madeireira.

Callaghan *et al.* (1995) alegam que existe grande dificuldade de prever os impactos das mudanças climáticas nos ecossistemas terrestres devido à complexidade das interações entre os próprios ecossistemas e as diversas variáveis ambientais envolvidas. No entanto, eles apontam algumas mudanças: o subártico é mais propenso a perder espécies do que receber espécies invasoras, no Alto Ártico há a probabilidade de haver mudanças nos ecótipos¹, o avanço da floresta boreal em direção ao Norte; mamíferos e aves poderão se adaptar a mudanças na distribuição de alimentos, mas vertebrados e invertebrados podem ter mais dificuldade com a qualidade das plantas alimentares, enquanto os animais não migratórios podem ser gravemente afetados por conta das condições da neve que por sua vez afetam a disponibilidade de abrigo.

Figura 8- Índice da variação da vegetação, indicando que o Ártico está mais verde. Fonte: Earth Observatory, 2015

As mudanças na vegetação também podem causar um retroprocessamento positivo, Pearson *et al.* (2013) estimam que pelo menos metade das áreas vegetadas se deslocarão para uma classe fitofisionômica diferente, as relações entre vegetação, albedo, evapotranspiração e biomassa resultaria no aumento do aquecimento e isso afetará o clima, vida selvagem e o ecossistema.

Mudanças na biota ártica

O Ártico é um lugar único, por isso contem espécies encontradas somente lá. Além disso, fornece alimentação e terreno fértil para os animais migratórios que vem do Sul. Há uma grande quantidade de aves migratórias, na ordem de centenas de milhões, que migram para a região no verão. No oceano, baleias e focas se alimentam de peixes e plâncton (AMAP, 2011). Alguns animais como os ursos polares, morsas e focas dependem do gelo para descansar e caçar (NRC, 2015). Portanto, a elevação das temperaturas no Ártico tem impacto na biota.

O urso polar (*Ursus maritimus*) vive basicamente sobre o gelo marinho, onde ele se alimenta caçando focas e, em lugares onde a neve é espessa, dorme no inverno. Por isso mudanças na cobertura do mar congelado afetam diretamente a população de ursos, como já ocorre nas baías de Hudson e James no Canadá (ACIA, 2004). Hunter

¹ Ecótipo é a presença de populações geneticamente únicas que são adaptadas ao seu ambiente local.

et al. (2010) projetam que até o fim do século XXI a população de ursos polares será reduzida drasticamente e por isso essa espécie está na lista de animais ameaçados pelas mudanças climáticas.

Além da diminuição do gelo marinho, outros fatores como o aumento e a intensidade das chuvas de primavera já causam danos nas tocas, causando a morte de ursos fêmeas e filhotes. E também o degelo mais cedo na primavera separa os sítios tradicionais de tocas das áreas de alimentação, os filhotes não conseguem nadar por grandes distâncias para se alimentar. O prognóstico para o futuro não é animador para os ursos polares, pois modelos apontam o desaparecimento do gelo marinho no verão e com isso a espécie pode ser extinta ou migrar para o Sul e disputar territórios com os ursos pardos e marrons, o que pode levar a uma hibridização (ACIA, 2004).

Algumas espécies de focas como a foca anelada (*Phoca hispida*), foca de bandas (*Phoca fasciata*) e a foca barbuda (*Erignatus barbatus*), dão a luz a seus filhotes sobre o gelo marinho. A foca anelada é a mais afetada por mudanças no gelo marinho, pois deixa seus filhotes nas tocas enquanto se alimenta, a desintegração do pacote de gelo na primavera pode separar mãe e filhotes causando mortes prematuras dos recém nascidos. A foca anelada raramente vai para terra firme, por isso uma futura adaptação será muito difícil, além do fato de expor seus filhotes ao um maior risco de serem mortos por predadores (ACIA, 2004).

O Ártico é sazonalmente povoado por cerca de 200 espécies de pássaros. A maior parte desses pássaros passa uma pequena parte do ano lá, porém é nessa região que algumas espécies se reproduzem (Ganter *et al.*, 2013). Kuletz e Karnovsky (2012) afirmam que 64 espécies de aves são consideradas árticas por essa razão.

As mudanças climáticas afetam as populações de aves no Ártico, seja mudanças no próprio Ártico, nas rotas migratórias ou nas áreas de invernção (Ganter *et al.*, 2013). Algumas espécies como o Arau-comum (*Uria aalge*) e o Airo de Brünnich (*Uria lomvia*) mostram um decréscimo populacional devido ao aumento da temperatura superficial do mar (Kuletz e Karnovsky, 2012). No entanto, a ação humana como a caça, intensificação agrícola e perdas de habitat tem causado mais danos às aves do que as mudanças climáticas (Ganter *et al.*, 2013).

Espécies como a gaivota de marfim (*Eburnea do pagophila*) e torda-anã (*Alle alle*) estão muito propensas a terem impactos negativos em suas populações devido a retração do gelo marinho, observações no Canadá apontam um declínio de 90% na população de gaivotas de marfim nos últimos 20 anos (ACIA, 2004).

O gelo marinho também tem um importante papel no crescimento das algas microscópicas (fitoplâncton), essas algas crescem fixadas nele. Na primavera, os raios de sol penetram o gelo marinho permitindo que o fitoplâncton, que está na base do gelo, faça a fotossíntese. Eventualmente, no derretimento do gelo, essas algas são liberadas na coluna d'água e afundam em direção ao assoalho oceânico, fornecendo então alimento para uma fauna de invertebrados bentônicos. As comunidades de invertebrados bentônicos são formadas por animais subaquáticos que vivem sobre ou enterrados no substrato do fundo do mar, estes animais por sua vez são alimentos de patos, morsas e baleias-cinzentas (Arrigo, 2013).

O gelo de primeiro ano é mais favorável ao crescimento do fitoplâncton, pois é mais fino e mais uniforme, deixando passar mais luz para o oceano. Por isso, uma das consequências do desaparecimento do gelo marinho mais velho é uma fração maior dessa biomassa afundando e servindo de comida para o zooplâncton como o krill (que por sua vez é alimento de peixes, aves, focas e baleias). O aumento das algas poderá alterar o tempo e magnitude da produção nas plataformas continentais do Ártico. No entanto, há a necessidade de mais estudos para saber como o ecossistema irá reagir a essas mudanças (Arrigo, 2013).

Os peixes também são afetados com as mudanças no Ártico. Como visto no parágrafo acima, a disponibilidade de alimento está maior e o oceano está mais quente, assim há a possibilidade de espécies de peixes migrarem para o Norte. Vermeij e Roopnarine (2008) chamam de invasão ártica a migração de cardumes do Pacífico Norte para o Oceano Ártico através do estreito de Bering. Eles relatam que isso já ocorreu há cerca de 3,5 milhões de anos, durante o Plioceno, época em que o Ártico era mais quente, essa "invasão" levou a extinção de muitas espécies no Atlântico Norte. Wisz *et al.* (2015) dizem que o aquecimento do Ártico facilita a migração de peixes entre o Oceano Pacífico e Atlântico. Eles modelaram o intercâmbio de 515 espécies, e os resultados apontam que, até o ano de 2100, 41 espécies poderiam adentrar no Pacífico e 44 no Atlântico, o que pode resultar em mudanças na biodiversidade e na cadeia alimentar desses oceanos.

Além das mudanças ambientais, a migração de peixes no Ártico pode ocasionar conflitos por áreas de pesca. A diminuição do gelo marinho abre novas oportunidades para essa atividade, no entanto, a reivindicação de zonas econômicas exclusivas (ZEE) no Ártico pode causar tensões ocasionadas por áreas de interesse,

uma vez que os cardumes podem migrar de uma ZEE de um país para outro.

Aumento nas tempestades

A NASA (2008) estudou o aumento da frequência e intensidade das tempestades no Ártico entre o período 1950–1972 e 2000–2006 (Figura, 9), atribuindo isso ao aumento na temperatura superficial do mar atrelado a menor extensão do gelo marinho. É possível que o aumento nas tempestades torne o OA mais agitado, misturando mais as camadas quentes e frias, isso por sua vez poderia sequestrar mais carbono da atmosfera, o que seria um retroprocessamento negativo.

Dados de temperatura do ar e pressão de boias no Ártico foram usados para fazer o trajeto das tempestades. Os dados mostram um aumento nas tempestades no Ártico no segundo período estudado. A deriva do gelo marinho está intimamente ligada ao vento, pois este empurra o gelo. Assim, tempestades mais fortes sobre o gelo marinho empurram-o fortemente, isso mistura mais as correntes e possivelmente aumente a capacidade do oceano de sequestrar carbono da atmosfera (NASA, 2008).

Figura 9- Aumento nas tempestades no Ártico, comparação entre os períodos 1950–1972 e 2000–2006, trajeto das tempestades em vermelho. Fonte: NASA, 2008.

Recentes estudos investigaram a relação do aquecimento do Ártico com médias latitudes. Devido a drástica diminuição da cobertura de gelo marinho, o oceano recebe mais energia, principalmente no outono e inverno essa energia é irradiada de volta para a atmosfera, Serreze e Barry (2011) apontam que isso causa diminuição no gradiente de pressão entre médias e altas latitudes, isto diminui a velocidade da corrente de jato, tornando as ondas de Rossby mais meandantes,

desestabilizando o vórtice polar, ou seja, uma fase negativa da oscilação Ártica. Essa desestabilização torna os invernos mais rigorosos na Europa, Ásia e América do Norte (Cohen *et al.*, 2014; Francis e Skific, 2015; Overland *et al.*, 2015).

A Oscilação Ártica é um módulo de variabilidade de larga escala, também conhecido como Modo Anular do Hemisfério Norte (MAHN). Essa oscilação é caracterizada pela circulação de ventos em sentido anti-horário em torno de 55°N. Quando ela está em fase positiva, as correntes de

jato atuam de forma mais retilíneas, formando um anel de ventos fortes que limitam a saída de ar frio do Ártico. Do contrário, quando ela está em fase negativa, esse cinturão de ventos torna-se mais meandrante, permitindo a penetração de massas de ar mais frias em direção ao Sul e causando mais tempestades em médias latitudes (NOAA, 2015).

Retração das geleiras

A Groenlândia guarda aproximadamente 3 milhões de km³ de gelo e as outras geleiras no Ártico conservam cerca de 250 mil km³. Se todas as geleiras do Ártico, incluindo o manto de gelo da Groenlândia, derretessem, o nível do mar subiria cerca de 8 metros. Muitas geleiras estão diminuindo de tamanho por conta do aumento das temperaturas e isso tem contribuído para o aumento do nível médio dos mares (AMAP, 2012).

Há três maneiras de se monitorar as geleiras; pelo balanço de massa, altimetria e mudanças na gravidade (AMAP, 2012). O balanço de massa é a razão entre a entrada e saída de neve, uma geleira tem balanço positivo, ou seja, cresce, em períodos frios com precipitação adequada e em épocas mais quentes a linha de equilíbrio migra a montante, e a geleira retrai, tendo um balanço negativo (Christopherson, 2012). A altimetria pode

ser feita por laser ou radar, aeronaves e satélites, além de topografia com estação total, para se estimar a altura da geleira. Assim, mudanças no volume indicam se a geleira está ganhando ou perdendo massa. Mudanças na gravidade são mensuradas por satélites, em 2002 um par de satélites foram lançados na missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*). Os satélites viajam na mesma órbita a 200 km de distância entre si, monitorando a velocidade que viajam, pois esta é alterada pela gravidade. Pela alteração na distância entre eles é possível calcular a gravidade e relacionar isso ao volume das massas de gelo (AMAP, 2012).

O manto de gelo da Groenlândia apresenta pequenas espessuras nas bordas, chegando 3.200 metros no centro. De acordo com mensurações de satélites da NASA, 97% da camada superficial da Groenlândia experimentou um derretimento em meados de julho de 2012 (Figura 10), a maior proporção já detectada em três décadas de observações. Os cientistas dizem que eventos como esse ocorrem uma vez a cada 150 anos, porém quando combinados com outros eventos naturais, diferente do que ocorreu em 2012 (Earth Observatory, 2015).

Figura 10- Derretimento das camadas superficiais do manto de gelo da Groenlândia entre 8 e 12/07/2012. Fonte: Earth Observatory, 2012.

À esquerda da imagem, dia 08/07/2012, 40% da superfície do manto de gelo apresenta derretimento próximo à superfície, já no dia 12 do mesmo mês a extensão da área derretida aumentou significativamente. As imagens são classificadas como provável derretimento (rosa claro), que corresponde a áreas onde apenas um satélite identificou derretimento e as áreas de derretimento (rosa escuro) correspondem a áreas onde dois ou

três satélites detectaram derretimento (Earth Observatory, 2015).

Quase todas as geleiras árticas retraíram nos últimos 100 anos e a taxa de derretimento tem aumentado nas últimas décadas. As geleiras canadenses apresentaram, em 2012, uma perda líquida de gelo três vezes maior do que em 2005. Uma das áreas com mais perda de gelo, é o sul do Alasca (AMAP, 2012). De acordo com um estudo de Larsen *et al.* (2015), que monitorou 116 geleiras

no sul do Alasca, a região perdeu cerca de 75 bilhões de toneladas (75 Gt) de gelo por ano no período 1994–2013.

Devido as perdas do gelo de geleiras, o Ártico é o principal contribuidor para o aumento do nível médio dos mares. Este está subindo desde meados do século XIX, no século XX a taxa de elevação foi de 1–2 mm por ano, porém no século XXI essa taxa aumentou e entre 2003 e 2008 foi de 2,5 mm por ano em média (AMAP, 2012).

Discussão

As rápidas mudanças ambientais no Ártico

Devido ao aumento dos gases de efeito estufa ao longo dos dois últimos séculos, no século XXI tivemos 14 dos 15 anos mais quentes, desde que começaram as medições instrumentais em 1850 (WMO, 2015). No mesmo período, as temperaturas médias em algumas regiões do Ártico aumentaram até 5°C. O Ártico, então, é uma das regiões a responder mais intensamente às mudanças na composição química da atmosfera. O Ártico foi a região que mais aqueceu nos últimos 50 anos, 2,4°C na temperatura média (AMAP, 2012).

Serreze e Barry (2011) apontam que o aquecimento excepcional do ar superficial ártico ajuda na diminuição da extensão do gelo marinho, o qual rumo ao seu desaparecimento sazonal no verão (Overland e Wang, 2013). O gelo marinho ártico tem comportamento sazonal bem marcado entre o inverno e verão. Desde que começaram as medições com satélite em 1979, tem-se percebido uma leve diminuição da extensão do gelo marinho no inverno boreal, porém uma redução significativa no verão.

A extensão do gelo marinho atingiu a extensão mínima recorde em setembro de 2012, quando a média mensal foi de 3,61 milhões de km², representando apenas 50% da extensão média para o mesmo mês no período 1979–2000. Desde 1979 a extensão mínima do gelo marinho tende a decrescer, é claro, quebrada de tempos em tempos por leve aumento, pois o sistema climático não é linear.

O gelo marinho tem um papel muito importante no balanço de energia global, pois ele reflete a maior parte da energia que recebe de volta para o espaço devido ao seu alto albedo, *i.e.*, é um sorvedouro de energia. Diminuindo a extensão do gelo marinho, o oceano passa a receber mais energia e, por sua vez, o albedo do oceano é muito baixo e este absorve mais energia que também penetra mais profundamente, alguns metros, na lâmina d'água (Kwok e Untersteiner, 2011; NSIDC 2015). Dessa maneira, o oceano está respondendo a esse aumento de energia, elevando sua

temperatura, com anomalias positivas de 6°C na região do mar de Barents e Kara. O Oceano Ártico apresenta as maiores temperaturas justamente onde o gelo marinho derrete primeiro, nas regiões supracitadas, possibilitando esse processo de recebimento de energia de forma contínua, como observado pela NASA (2013). O oceano mais quente favorece o derretimento do gelo.

Da mesma maneira, a biota ártica pode ser afetada, primeiro pela menor extensão e segundo pelo rejuvenescimento do gelo marinho. Ursos polares, focas e outros animais dependem do gelo marinho para sobreviver. Os ursos polares caçam sobre o gelo e as focas, por exemplo, o usam para descansar (ACIA, 2004). O gelo marinho mais antigo de quinto ou sexto ano, ou até mesmo mais antigo, está sendo substituído por um gelo mais jovem de primeiro ou segundo ano (Norwegian Polar Institute, 2015). Isso está acontecendo por que a taxa de derretimento está bastante elevada, assim o gelo não consegue “envelhecer”, esse gelo mais jovem é mais translúcido que o antigo, assim os raios solares transpassam o gelo, favorecendo o aumento da quantidade de fitoplâncton, o que por sua vez pode atrair cardumes de peixes procurando regiões mais frias (Brander, 2010).

Outro ponto que tem preocupado os cientistas é a redução acentuada do volume do gelo marinho. Devido ao derretimento do gelo mais antigo, que também é mais espesso, o gelo mais jovem é mais fino, conseqüentemente ele tende a derreter primeiro, isso também tem impacto sobre os povos indígenas, pois há relatos de caçadores que morreram ao cair na água, quando caçavam (Nasmith e Sullivan, 2010).

Outro indicador das rápidas mudanças ambientais no Ártico, é o descongelamento do permafrost. O permafrost encontrado hoje no Hemisfério Norte, é remanescente do Último Máximo Glacial, que teve seu auge há 18.000 anos (Ruddiman, 2001). O permafrost está descongelando devido ao aumento da temperatura superficial do ar e conseqüentemente desaparecendo em algumas áreas (Bockheim, 2015).

Observa-se que as previsões para o descongelamento do permafrost são incertas, há uma grande variação, entre 30–80% da área até 2100, mas a maior preocupação é com a quantidade de CO₂ e CH₄ (metano) armazenados no solo, cerca de 1700 Gt de CO₂ (UNEP, 2012), aproximadamente o dobro da quantidade desses gases presentes hoje na atmosfera. Com isso, o descongelamento do permafrost pode ter um alto impacto nas mudanças climáticas ao gerar um retroprocessamento positivo, ou seja, mais permafrost derretido aumenta a concentração de

gases estufas, que por sua vez intensifica o aquecimento atmosférico, que leva a mais derretimento do permafrost, e assim por diante.

Ademais, o descongelamento do solo afeta diretamente a infraestrutura no Ártico, danifica casas, prédios e outros tipos de construções, elevando o gasto público com o reparo dos mesmos (Larsen *et al.*, 2008). As mudanças climáticas afetam tanto os povos indígenas, como os residentes não indígenas, pois todos necessitam de bens e serviços que podem ser reduzidos, devido, por exemplo, a deterioração de estradas.

Somente no estado do Alasca estima-se um aumento na ordem de 3 a 6 bilhões de dólares americanos até 2100 nos gastos públicos devido ao descongelamento do permafrost, o qual também favorece a erosão costeira.

Nas últimas décadas a área coberta por neve no Ártico foi reduzida na primavera e no verão, o que também reduz o albedo planetário. Ainda, a neve é um dos controladores do permafrost, com menos neve, o solo fica exposto, podendo descongelar, a vegetação também recebe mais energia, alterando o ciclo de crescimento das plantas. Além da menor área coberta, a neve está derretendo mais cedo, principalmente nas regiões costeiras do Alasca, norte do Canadá e norte da Escandinávia, como destaca o AMAP (2011). Isso acontece pelo aumento da temperatura superficial do ar. Por outro lado, em algumas regiões da Sibéria, há ocorrência de maior precipitação de neve, onde agora há mais umidade disponível na atmosfera, pois na região ao norte da Rússia o oceano está mais quente, ocorrendo mais evaporação (NOAA, 2013).

Sendo assim, mudanças na cobertura de neve deixam a vegetação mais exposta, juntando isso ao descongelamento do permafrost e temperaturas mais elevadas, tem-se uma expansão da vegetação em direção ao Norte. ACIA (2004), Hoag (2012), NASA Earth Observatory (2015), relatam que a linha de árvores está se deslocando para Norte, regiões do deserto polar passaram a apresentar gramíneas e áreas antes predominadas por estas apresentam pequenos arbustos (Xu *et al.*, 2013). Dessa forma, o Ártico está mais verde e com isso as espécies tendem a acompanhar essa mudança.

Alguns autores como Hunter *et al.* (2010), Kuletz e Karnovsky (2012) e Ganter *et al.* (2013), apontam que a biota Ártica também está mudando,

já comentamos como os ursos polares e focas são afetados pela retração do gelo marinho, mas também algumas aves apresentam diminuição no número de indivíduos por causa das mudanças climáticas. A migração de peixes pode também causar tensões relacionadas às áreas de pesca, pois as ZEEs dão autoridade sobre recursos vivos e não vivos, então as mudanças na posição dos cardumes poderão causar conflitos de interesse.

Ainda, outro indício de mudanças ambientais é o aumento no número de tempestades. De acordo com Serreze e Barry (2011), a retração do gelo marinho faz com que o oceano receba mais energia, parte dessa é irradiada de volta para atmosfera, com mais energia presente na atmosfera, ocorrem mais tempestades. As tempestades empurram o gelo marinho com força, fazendo este ir para áreas mais ao Sul, onde derrete. O aumento desses eventos também pode aumentar o fluxo de águas mais quentes em direção ao Ártico, esse seria um dos motivos da menor extensão do gelo marinho em 2012.

Assim, o Ártico está passando por rápidas mudanças ambientais. Destaca-se que o gelo marinho é um dos principais fatores a serem levados em conta nessas mudanças, por isso concorda-se com ACIA (2004) e Kwok (2010), que dizem que o gelo marinho é ator e também indicador das mudanças climáticas, e ele tem papel central tanto na questão do albedo planetário, como no aumento das temperaturas superficiais do mar, com claras implicações para a atmosfera e biota.

As mudanças ambientais trouxeram novos desafios políticos no Ártico. Por isso, desde 2006, começando pela Noruega, os países árticos criaram ou revisaram seus planos de políticas estratégicas para o Ártico (Souza Junior, Rosa e Simões, 2015). A redução do gelo marinho também abre as rotas marítimas Nordeste e Noroeste que prometem intensificar o fluxo de navios comerciais no Ártico, além disso a presença de óleo e gás no Oceano Ártico cria tensões por conta da reivindicação do aumento das ZEEs no Oceano Ártico (Souza Junior, Rosa e Simões, 2016).

A figura 11 é uma tentativa de ilustrar as relações entre as mudanças ambientais (em amarelo) e geopolíticas (em azul), ora em decurso no Ártico. Note que além das observações científicas, a comunidade indígena registra e sofre as consequências dessas transformações.

Figura 11- A amplificação Ártica, testemunhada pelos povos indígenas. Note que imagem mostra a existência de vários retroprocessamentos que aceleram as mudanças ambientais no Ártico. Fonte: Autor, 2016.

Considerações finais

O aumento da concentração dos gases estufas (principalmente CO_2 e CH_4) na atmosfera é responsável pela intensificação do efeito estufa e consequentemente a elevação das temperaturas. A atmosfera mais quente favorece a retração das geleiras, essas contribuem para o aumento do nível mar e menor albedo planetário.

Com maiores temperaturas superficiais do ar, ocorrem mudanças na neve, como menor duração, extensão e volume, isso contribui para o descongelamento do permafrost, que por sua vez, causa danos na infraestrutura e pode lançar na atmosfera grande quantidade de CH_4 , contribuindo para maior elevação das temperaturas. O descongelamento do permafrost tem impacto na vegetação, pois o solo descongelado favorece o crescimento de raízes, essencial para o desenvolvimento da vegetação.

O gelo marinho também é impactado pela temperatura superficial do ar, diminuindo sua extensão e volume, isso tem reflexo no balanço de energia global. Devido ao menor albedo planetário, a retração do gelo marinho permite que o oceano receba mais energia, aquecendo as águas superficiais. As águas superficiais mais quentes do

Oceano Ártico podem alterar a dinâmica do oceano, como, por exemplo, a formação das águas de fundo, o que prejudica o sequestro de carbono da atmosfera. A biota também é afetada pela menor extensão do gelo marinho, pois os animais têm menos áreas de descanso e caça. Essa retração de gelo, também é indicada como uma das responsáveis pelo aumento das tempestades no Ártico, por causa do menor albedo e do oceano mais quente. O gelo marinho, então, tem um papel central nos reprocessamentos positivos do Ártico e por isso está localizado no centro da figura.

Todas essas mudanças ambientais geraram o interesse internacional, pois agora o Ártico está mais acessível e essas mudanças geram desafios, principalmente para os países árticos, isso levou esses países a desenvolverem estratégias para a região, tendo em conta o desafio originado pelo maior tráfego marítimo na região provocado pela abertura das novas rotas.

O acesso a novas fontes de recursos gera o interesse dos países litorâneos em expandir suas ZEEs, provocando novas reivindicações territoriais dentro do oceano. Essa corrida em direção ao Ártico, faz com que os países reafirmem suas soberanias com a presença física na região e exercícios militares. Todo esse interesse no Ártico,

causado é claro pela quantidade de recursos disponíveis, tem elevado a tensão na região.

Agradecimentos

E. Souza Júnior agradece a CAPES por uma bolsa de mestrado. Este trabalho foi apoiado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e faz parte das investigações do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR).

Referências

- ACIA, 2004. Hassol, S.J. Cambridge: Cambridge University Press, 139 p.
- AMAP, 2012. Arctic Climate Issues 2011: Changes in Arctic Snow, Water, Ice and Permafrost. SWIPA 2011 Overview Report. Oslo: Narayana Press.
- Arrigo, K.R., 2013. The changing Arctic Ocean. *Elementa: Science of the Anthropocene* 1, 1–5.
- Bockheim, J.G., 2015. Cryopedology. Nova York: Springer.
- Brander, K., 2010. Impacts of climate change on fisheries. *Journal of Marine Systems* 79, 389–402.
- Brown, J., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D., Wright, J. 1989. Ocean Circulation. Milton Keynes, the Open University: Pergamon Press, England.
- Callaghan, T.V., Jonasson, S., Nichols, H., Heywood, R.B., Wookey, P.A., 1995. Arctic terrestrial ecosystems and environmental change [and discussion]. *Philosophical Transactions A, Londres* 352, 259–276.
- Christopherson, R.W., 2012. Geossistemas: uma introdução à Geografia Física. 7ª ed, Porto Alegre: Bookman.
- Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J.C., Barlow, M., Whittelston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J., Jones, J., 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience* 7, 627–637.
- Davis, N., 2000. Arctic Oceanography, Sea ice and Climate. In: NUTTALL, Mark; CALLAGHAN, Terry V. The Arctic: Environment, People, Policy. Amsterdã: Harwood Academic, pp. 97–115.
- Derksen, C., Brown R., 2012. Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical Research Letters* 39. doi: 10.1029/2007GL031480
- Dye, D.G., 2002. Variability and trends in the annual snow-cover cycle in Northern Hemisphere land areas, 1972–2000. *Hydrological Processes* 16, 3065–3077.
- EARTH OBSERVATORY. Alaska's biggest (ice) losers are inland. Disponível em: <<http://climate.nasa.gov/news/2305/>>. Acesso em: 22/07/2015.
- Elverland, E., 2009. The Arctic System. Tromsø: Norwegian Polar Institute.
- Francis, J., Skific, N., 2015. Evidence linking rapid Arctic warming to mid-latitude weather patterns. *Philosophical Transactions A*. 373, 1–9.
- Ganter, B., Gaston A.J., Birds. Arctic Biodiversity Assessment CAFF. 2013 Disponível em: <<http://www.arcticbiodiversity.is/the-report/chapters/birds>>. Acesso em 24/07/2015
- Hoag, H., 2012. Arctic snow cover shows sharp decline: Earlier spring could spell trouble for permafrost. *Nature News*. Disponível em: <<http://www.nature.com/news/arctic-snow-cover-shows-sharp-decline-1.11709>>. Acesso em 20/04/2016.
- Hunter, C. Caswell, H., Runge, M.C., Regehr, E.V., Amstrup, S.C., Stirling, I., 2010. Climate change threatens polar bear populations: a stochastic demographic analysis. *Ecology* 91, 2883–2897.
- IPCC., 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kerr, R.A., 2012. Ice-free Arctic sea may be years, not decades, away. *Science Climate Change* 337, 1591
- Kuletz, K.J., Karnovsky N. J. Seabirds. NOAA Arctic report Card: Update for 2012. Disponível em: <<http://www.arctic.noaa.gov/report12/seabirds.html>>. Acesso em: 24/07/2015
- Kwok, R., 2010. Satellite remote sensing of sea-ice thickness and kinematics: a review. *Journal of Glaciology* 56, 1129–1140.
- _____, Untersteiner N. 2011. The thinning of Arctic sea ice. *Physics Today*, 36–41. doi: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3580491>
- Larsen, C.F., Burgess, E., Arendt, A.A., O'neil, S., Johnson, A.J., Kienholz, C., 2015. Surface melt dominates Alaska glacier mass balance. *Geophysical Research Letters* 42, 5902–5908.
- Larsen, P.H., Goldsmith, S., Smith, O., Wilson, M.L. Strzepek, K., Chonowsky, P., Saylor, B., 2008. Estimating future costs for Alaska public infrastructure at risk from climate change. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 18, 442–457.

- NASA GISTEMP. GISS Surface Temperature Analysis. Disponível em: <http://data.giss.nasa.gov/cgi-bin/gistemp/nmaps.cgi?sat=4&sst=6&type=trends&mean_gen=1212&year1=1964&year2=2014&base1=1964&base2=2014&radius=1200&pol=rob>. Acesso em: 04/12/2015
- NASA. 2008. Study Finds Rising Arctic Storm Activity Sways Sea Ice, Climate. Disponível em: <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/arctic_storm.html>. Acesso em: 29/07/2015
- Nasmith, K., Sullivan, M., 2010, Climate Change Adaptation Plan. Hamlet of Arviat, Nunavut: Building capacity in Community Planning.
- NOAA. Arctic Oscillation (AO). Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/a/o/>>. Acesso em 28/07/2015.
- NOAA Earth System Research Laboratory. Recent Monthly Average Mauna Loa CO₂. Disponível em: <<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#mlo>>. Acesso em: 31/08/2015.
- NORWEGIAN POLAR INSTITUTE. Norwegian Young sea ICE cruise (N-ICE2015). Disponível em: <<http://www.npolar.no/en/projects/details?pid=b98886ce-590a-48a8-b113-4b96e98c65c8>>. Acesso em: 09/09/2015.
- NSIDC. All about sea ice. Disponível em: <<http://nsidc.org/cryosphere/seaice/index.html>>. Acesso em: 21/07/2015.
- NSIDC. Climate change in the Arctic. Disponível em: <https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/climate_change.html>. Acesso em: 23/10/2014.
- NRC. 2015. Arctic Matters: the global connection to changes in the Arctic. National Research Council: Washington, 32 p.
- Overland, J., Francis, J.A., Hall, R., Hanna, E., Kim, S-J., Vihma, T., 2015. The melting arctic and mid-latitude weather patterns: are they connected? *Journal of Climate* 28, 7917–7932.
- Overland, J., Wang, M., 2013. When will the summer Arctic be nearly sea ice free? *Geophysical Research Letter* 40, 2097–2101.
- Pearson, R.G., Phillips, S.J., Loranty, M.M., Beck, P.S.A., Damoulas, T., Knight, S.J., Goetz, S.J., 2013. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change. *Nature climate change* 3, 673–677.
- Perovich, D.K., Light, B., Eicken, H., Jones, K.F., Runciman, K., Nghiem, S.V., 2007. Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979–2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback. *Geophysical Research Letters* 34. doi: 10.1029/2007GL031480
- Perovich, D.K., Meier, W., Tschudi, M., Gerland, S., Richter-Menge, J., Arctic Report Card – Sea ice. Disponível em: <http://www.arctic.noaa.gov/report12/sea_ice.html>. Acesso em: 03/07/2015
- Ruddiman, W.F., 2001. *Earth's Climate: Past and Future*. Nova York: Freeman.
- Schmiegelow, J.M.M., 2004. *O planeta azul: uma introdução às ciências marinhas*. Rio de Janeiro: Interciência.
- Serreze, M.C., Barry, R.G., 2011. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change* 77, 85–96.
- Serreze, M.C., Holland, M.M., Stroeve, J., 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science* 315, 1533–1536.
- Souza Junior, E., Rosa, K.K., Simões, J.C., 2015. Geopolítica do Ártico: mudanças nas políticas para o norte. *Geographia Meridionalis* 1, 248–267.
- Souza Junior, E., Rosa, K.K., Simões, J.C., 2016. Novas dinâmicas territoriais no ártico: cooperação ou nova guerra fria? *Boletim Gaúcho de Geografia*. No prelo.
- Spencer, R.G.M., Mann, P.J., Dittmar, T., Eglinton, T.I., McIntyre, C., Holmes, R.M., Zimov, N., Stubbins, A., 2015. Detecting the signature of permafrost thaw in Arctic rivers. *Geophysical Research Letters* 42, 2830–2835.
- Srokosz, M., Baringer, M., Bryden, H., Cunningham, S., Delworth, T., Lozier, S., Marotzke, J., Sutton, R., 2012. Past, present, and future changes in the atlantic meridional overturning circulation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 1663–1676.
- UNEP. Policy Implications of Warming Permafrost. Disponível em: <<http://www.unep.org/pdf/permafrost.pdf>>. Acesso em: 28/08/2015.
- U.S. Arctic Research Commission Permafrost Task Force 2003. *Climate Change, Permafrost, and Impacts on Civil Infrastructure. Special Report 01-03*. U.S. Arctic Research Commission, Arlington, Virginia. <http://www.arctic.gov/publications/other/permafrost.pdf>
- Vermeij, G.J., Roopnarine, P.D., 2008. The coming Arctic invasion. *Science: Ecology* 321, 780–781.
- Wisz, M.S., Broennimann, O., Gronkjaer, P., Moller, P.R., Olsen, S.M., Swingedouw, D., Hedeolm, R.B., Nielsen, E. E., Guisan, A., Pellissier, L., 2015. Arctic warming will

- promote Atlantic–Pacific fish interchange. *Nature Climate Change* 5, 261–265.
- WMO. Warming Trend Continues in 2014. Disponível em: <https://www.wmo.int/media/?q=content/warming-trend-continues-2014>. Acesso em 31/08/2015.
- Xu, L., Mineni, R.B., Chapin III, F.S., Callaghan, T.V., Pinzon, J.E., Tucker, C.J., Zhu, Z., Bi, J., Ciais, P., Tommervik, H., Euskirchen, E.S., Forbes, B.C., Piao, S.L., Anderson, B.T., Ganguly, S., Nemani, R.R., Goetz, S.J., Beck, P.S.A., Bunn, A.G., Cao, C., Stroeve, J.C., 2013. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nature Climate Change* 3, 581–586.