برنامج الأمم المتحدة للبيئة

التبصُّر موجز 025

تموز/يوليو 2021

الإنذار المبكر والقضايا الناشئة والمستقبلية

العمل مع النباتات والتربة والمياه من أجل تبريد المناخ وإعادة ترطيب الأماكن الطبيعية في كوكب الأرض

معلومات أساسية

ينشرُ برنامج الأمم المتحدة للبيئة موجزاتِ التبصُّر لتسليط الضوء على نقطةٍ ساخنةٍ من نقاط التغيُّر البيئي، أو عرضِ موضوعٍ علميٍّ ناشئ، أو مناقشة قضية بيئية مُعاصرة. وتتاح للجمهور فرصةُ معرفة ما يحدث لبيئتهم المتغيرة باستمرار وعواقب الخيارات اليومية في الحياة، والتفكُّر في الاتجاهات المستقبلية للسياسات. في هذا الإصدار الخامس والعشرين، سنفهم بشكلٍ أفضل العلاقات المتشابكة ما بين النباتات والتربة والمياه على سطح الأرض، وكذلك ضمن الغلاف الجوِّي ومعه، وما ينجم عنها من تدفُّقات الطاقة المتبادلة. كما يشرحُ هذا الإصدار كيف تساعدُ هذه العلاقات في الحدِّ من تغير المناخ، وإنشاء نظام بيئي مرنٍ في الوقت نفسِه.

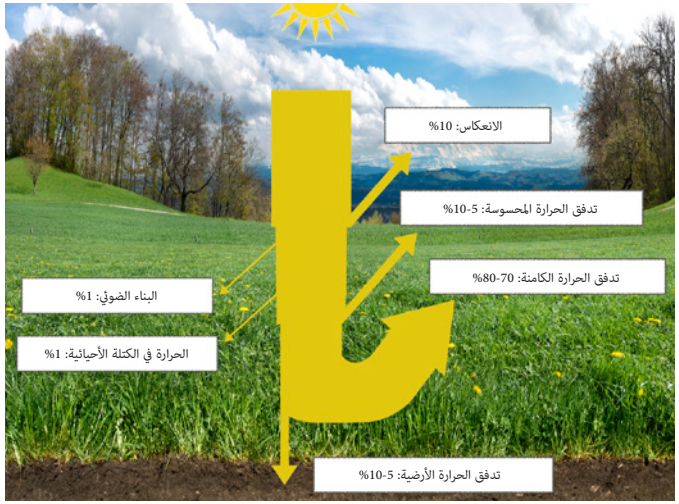
ملخص

يؤدي التدمير المتواصل للغابات، وتدهور التربة، وما يتبع ذلك من نقصٍ في مخزون مياه التربة الأرضية وقلة احتفاظ التربة بالمياه في الأماكن الطبيعية إلى خللٍ في حركة المياه ضمن الغلاف الجوِّي وعبرَه. وينجمُ عن هذا الخلل تبدلات كبيرة في هطول الامطار، الأمر الذي قد يقلِّل تساقط الأمطار ويزيد حالات الجفاف في أماكن كثيرة من العالم، ويسبِّب ارتفاعاً في درجات الحرارة الإقليمية وتفاقماً لتغير المناخ. وتؤثر هذه التغيرات على المناخ الإقليمي، لكن تأثيرها قد يصل إلى مناطق بعيدة أيضاً. ومن الممكن أن يساعد فهمُ العلاقات المتشابكة ما بين النباتات والتربة والمياه، وكذلك ضمن الغلاف الجوي، وما ينجمُ عنها من دفُّقات الطاقة المتبادلة، في الحدِّ من تغير المناخ وإنشاء نظام بيئي أكثر مرونةً في الوقت نفسِه.

مقدمة

يؤدي الغطاء النباتي دوراً هاماً في تنظيمِ المناخ، ولكن هذا الدور كثيراً ما يُغفَل. ومن الأمثلة على ذلك الفرق بين الوقوف وسط حقلٍ محروثٍ وأجرد في عصرِ أحد أيام الصيف الحارة، والوقوف في غابةٍ كثيفة. من الجليِّ أن تحويل الغابات، على سبيل المثال، إلى أراضٍ زراعية أو مناطق حضريَّة يسبِّب تغيراتٍ كبيرةً من شأنها التأثير في المناخ.

لا تتجاوز نسبة الإشعاع الشمسي الإجمالي الذي يبلغُ سطحَ حقلٍ مزروعٍ بكثافة وتُستخدم في البناء الضوئي 1% ، فيما تعمل نسبة 5 - 10% على تسخين الهواء ("الحرارة المحسوسة"[أ]). ويُستخدم أكثر من 70% من الإشعاع من أجل النَّتح النباتي، حيث يتحول الماء السائل إلى بخار الماء، وهي عملية تستهلك كثيراً من الطاقة ("الحرارة الكامنة"[أ]). ومع احتسابِ الأسطح غير



الشكل 1: توزُّع الطاقة الشمسية الساقطة على الغطاء النباتي.[1]

حقوق الصورة: *Shutterstock.com*

المزروعة والمسطحات المائية، فإن ما يقارب 50% من الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض يُستخدَم من أجل تبخُّر الماء ونتحِه ("التبخُّر والنَّتح"[ب]).[1-4]

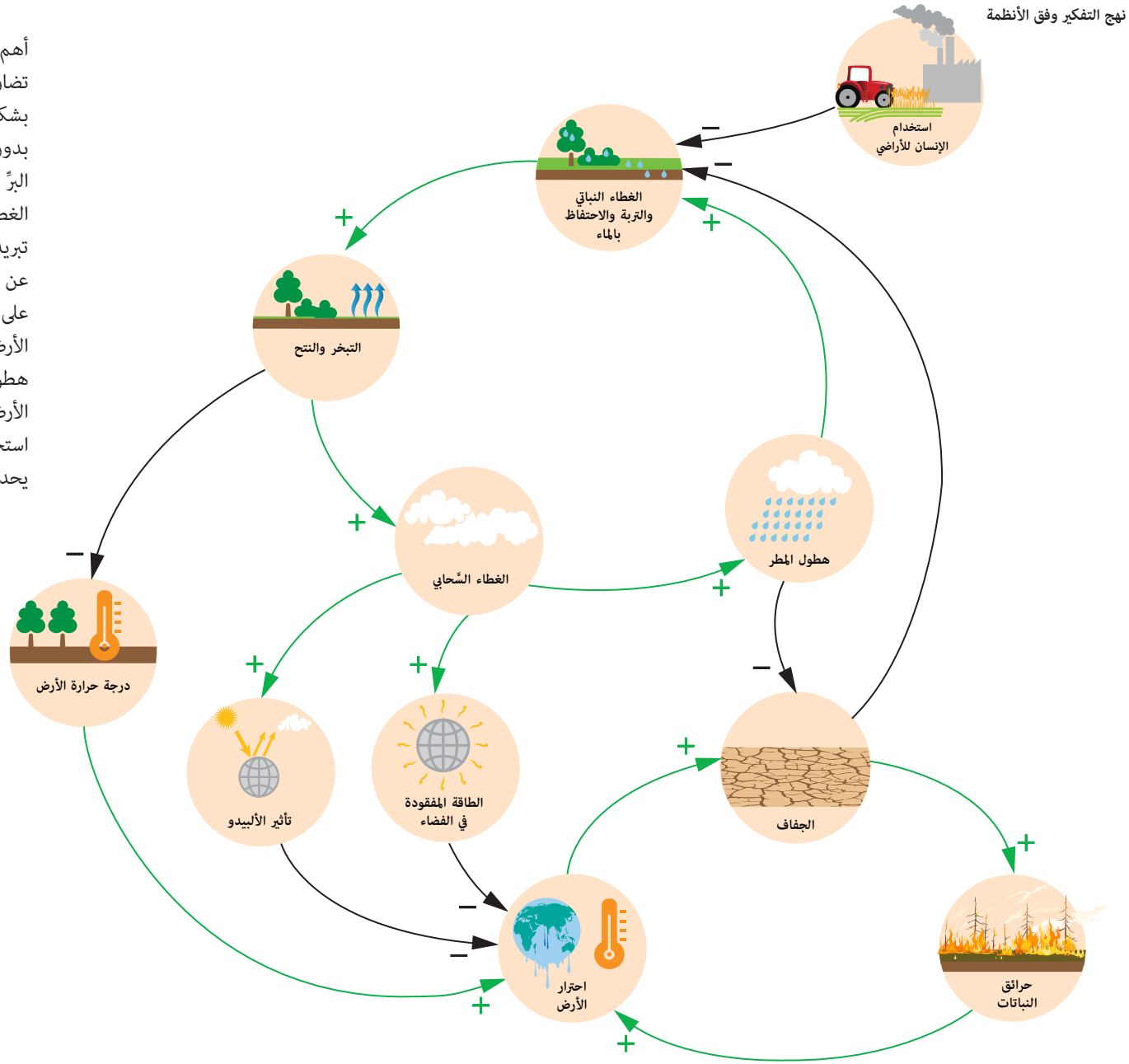
ومع ارتفاع هذه الكتل الهوائية إلى الغلاف الجوِّي، سيتكثَّف بخار الماء في نهاية المطاف، مُطلقاً القدر نفسه من الطاقة الذي استُهلِك على سطح الأرض، ويتبدَّدُ شيءٌ من تلك الطاقة في الفضاء. أما السُّحب المتشكِّلة حديثاً فستعكس الإشعاع الشمسي الوارد وتصبحُ المصدر الجديد للهطول.

(أ) الحرارة الكامنة والمحسوسة هي أنواعٌ من الطاقة التي تُطلق إلى الغلاف الجوِّي أو تُمتَصُّ فيه. ترتبط الحرارة الكامنة بالتغيرات في الأطوار بين السوائل والغازات والمواد الصلبة. أما الحرارة المحسوسة فترتبط بتغيرات درجة حرارة الغاز أو الشيء من دون تغيير الطَّور. (https://climate.ncsu.edu/edu/Heat)

(ب) هو اجتماع عمليَّتي تبخُّر الماء ونتحه من سطح الأرض إلى الغلاف الجوِّي.

نهج التفكير وفق الأنظمة

أهم المؤثرات السببية في هذا النظام - أدى استخدام البشر المتزايد للأراضي إلى تضاؤل الغطاء النباتي، وتدهور التربة، وضعف احتفاظ الأرض بالماء، ممَّا يؤدي بشكلٍ مباشر إلى نقص التبخُّر والنَّتح وارتفاع درجات حرارة الأرض، فتؤثِّر بدورها على ارتفاع درجات الحرارة العالمية. ومن شأن تزايد الغطاء النباتي على البرِّ أن يرفع خصوبة التربة ويستعيد المياه الجوفية ويزيد التبخُّر والنَّتح، فيزيد الغطاء السَّحابي وتتحسن كمية هطول المطر. مع زيادة الغطاء السَّحابي، يزيد تبريد الغلاف الجوِّي بسبب الانعكاس الإضافي للإشعاع الشمسي الوارد، فضلاً عن تحسُّن إعادة نقل الطاقة إلى الفضاء، ولهذين العاملَين معاً تأثيرات منظِّمة على احترار الأرض. وعندما يضعُف هذا التأثير التفاعلي المُوازِن، ستسخُن الأرض مسببةً مزيداً من حالات الجفاف التي ستشتدُّ وطأتها مع تناقص كمية هطول المطر وكثرة حرائق الغطاء النباتي، الأمر الذي يؤدي بدوره إلى احترار الأرض أكثر فأكثر. ومن الممكن عكسُ هذه الدورات من خلال سياساتٍ تعزِّز استخدام الأراضي بطرقٍ تزيد الغطاء النباتي وتحسن احتفاظ التربة بالماء. (+) يحدث التأثير في الاتجاه نفسه، (-) يحدث التأثير في الاتجاه المعاكس.

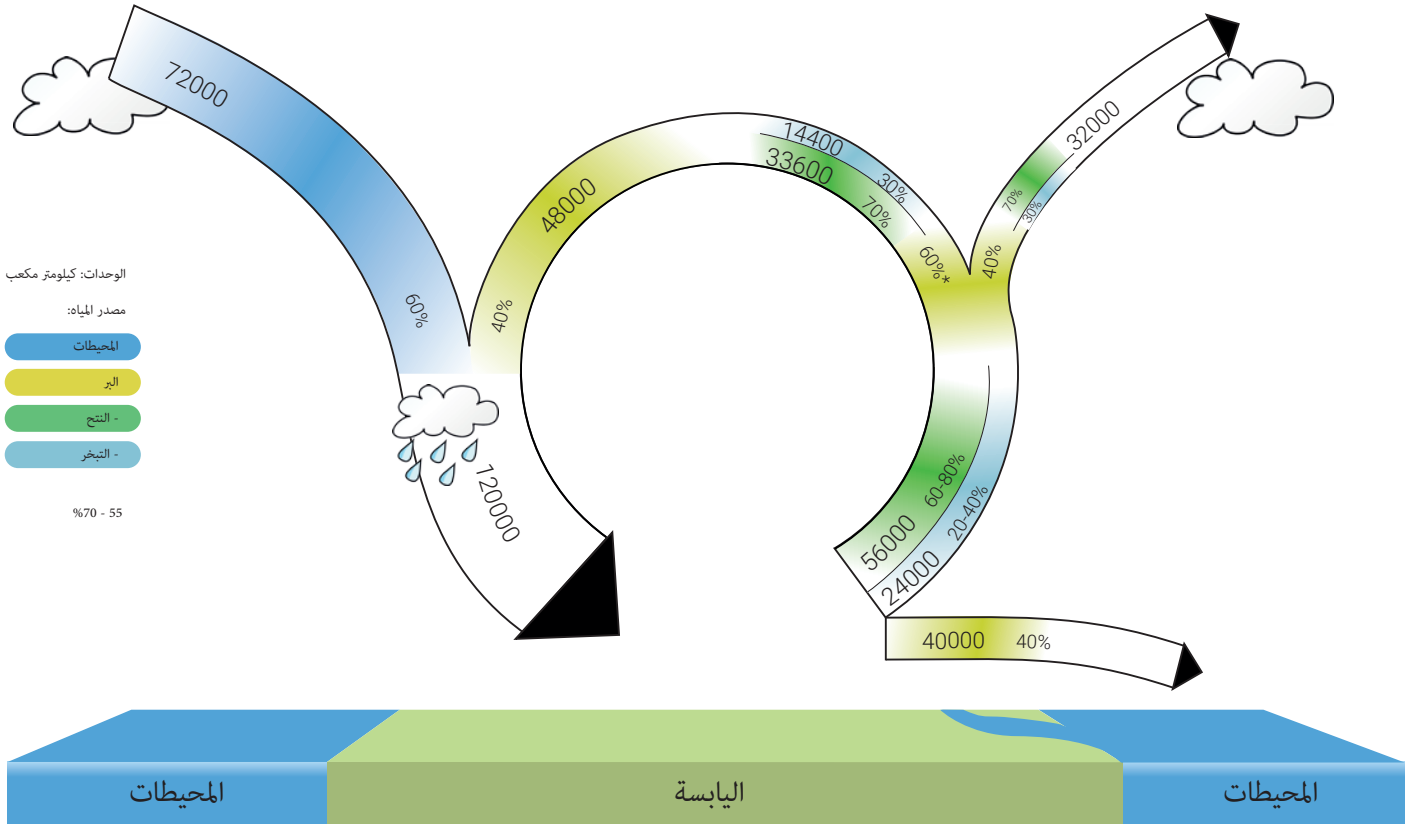


لماذا تُشكّل هذه المسألة أهمية؟

تُقدَّر كمية المياه المتساقطة على سطح الأرض على شكلِ هطولاتٍ بحوالي 120 ألف كيلومتر مكعب في السنة، حيث يصدر حوالي 60% منها عن المحيطات، و40% من اليابسة (**انظر الشكل 2**).[5, 6] ويُعتبَر النَّتح النباتي مصدراً لما بين 60 و80% من هذه الرطوبة الجوية الصادرة عن البر[2, 7, 8]، ممَّا يبيِّن مدى أهمية دور الغطاء النباتي في تغذية دورة الهطول، وكذلك في نقل الطاقة من الأرض إلى الطبقات العليا للغلاف الجوِّي.

وحتى عهدٍ قريب، كان يُعتقدُ أن تأثير البشر على كمية بخار الماء في الغلاف الجوي لا يُذكَر بالمقارنة مع التبخُّر من المحيطات. إلا أن تأثير البشر على بخار الماء في الغلاف الجوي نابعٌ من التغيرات الهائلة التي طرأت على الغطاء الأرضي بفعل البشر، وليس فقط بسبب الانبعاثات الصناعية، كما كان يُزعم في السابق. وبالفعل، هناك تأثير كبير للتغيرات في الغطاء الأرضي على دوراتِ بخار الماء في الغلاف الجوي.[9-11]

فقد العالم حوالي نصف غاباته منذ بدء الزراعة (وحدثت معظم حالات إزالة الغابات منذ عام 1950)[12, 13] لتتحول إلى حقولٍ ذات غطاء نباتي أقل كثافةً بكثير. ما هي تأثيرات هذه التغيرات الكبيرة في الغطاء الأرضي الناجمة عن فعل البشر على تدفُّقات المياه والطاقة في العالم؟



الشكل 2: تدفُّقات المياه عالمياً. من إجمالي كمية المطر المتساقط على القارات والمقدَّرة بـ *120* ألف كيلومتر مكعب، يأتي *72* ألف كيلومتر مكعب من المحيطات، بينما يصدُر *48* ألف كيلومتر مكعب عن اليابسة. ومن هذه الكمية الأخيرة، ينتُج *60-80%* عن النَّتح النباتي، و*20*و-*40%* عن المسطحات المائية والتربة. يعود *23* ألف كيلومتر مكعب من التبخُّر والنَّتح الصادر عن اليابسة إلى المحيط عن طريق رطوبة الهواء؛ ويُساقُ *40* ألف كيلومتر مكعب من المياه إلى المحيطات عبر الأنهار.[11]

المخطط البياني: معدّل من *Pearce72*. إعادة الطبع بإذن من الجمعية الأمريكية لتقدم العلوم (*AAAS*).

النتائج الرئيسية

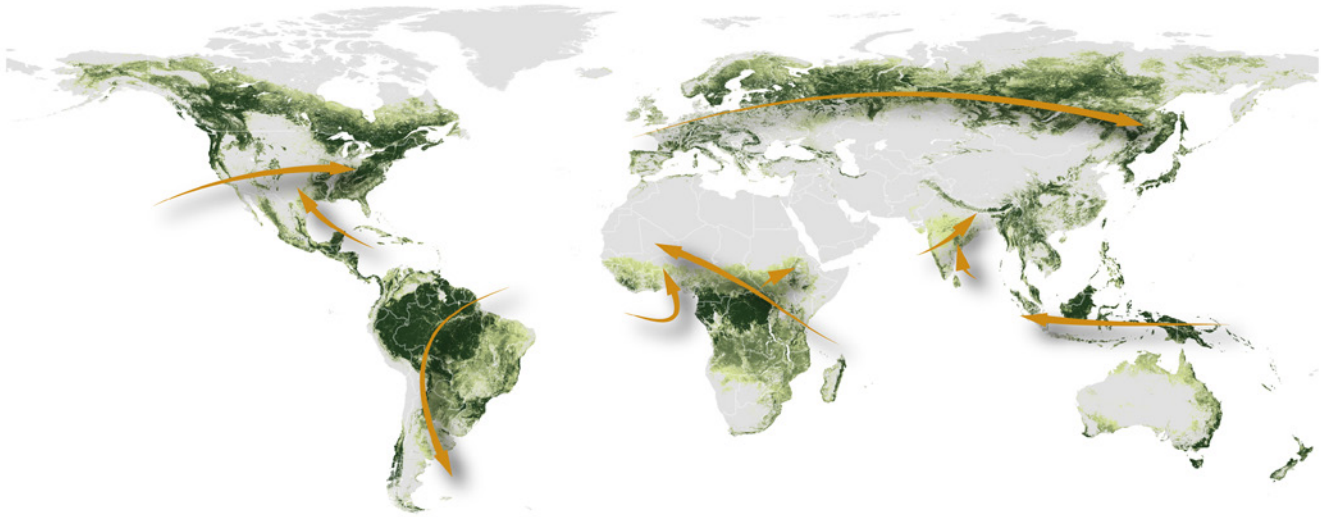
الأشجار بوصفها مولِّدات لبخار الماء

كلُّ شجرةٍ في الغابة هي بمثابة نافورة ماء، فهي تمتص الماء من التربة عن طريق جذورها، وتدفع به عبر جذعها وأغصانها وأوراقها، وتحرِّره في الغلاف الجوي على شكل بخار ماء عبر مسامات أوراقها. في يومٍ مشمسٍ عادي، يمكن أن تنتَح الشجرة الواحدة عدة مئات من الليترات من الماء، فتبرِّد محيطها بطاقةٍ قدرها 70 كيلو واط لكل 100 ليتر من الماء، أي أن تأثيرها المبرِّد يعادل جهازي تكييف منزليين يعملان على مدار 42 ساعة[14, 15]. وبما أن أعداد الأشجار تصل إلى مليارات، فهي تُنتج أنهاراً عملاقة من الماء تجوب الهواء ("الأنهار الطيارة")، وهذه بدورها تكوِّن السُّحب وتسبِّب هطولاتٍ على مسافاتٍ تصلُ إلى المئات أو حتى الآلاف من الكيلومترات (**الشكل 3**).[16، 17]

التبخُّر والنَّتح مصدراً للهطول

على مستوى العالم، ينشأ 40-60% من المطر المتساقط على اليابسة عن الرطوبة التي يولدها التبخُّر والنَّتح البري في الاتجاه المقابل للرياح، وجلُّ تلك الرطوبة ناتجٌ عن نتح الأشجار.[11، 14، 18-20] وفي بعض مناطق العالم، تصل هذه النسبة إلى 70% من كمية هطول المطر.[11] وتصبح عملية إعادة التدوير هذه أكثر بروزاً مع التوغُّل داخل اليابسة (**الشكل 4**).

لا تشغَلُ الغابات الاستوائية الدائمة الخضرة والعريضة الأوراق أكثر من 10% من مساحة اليابسة في العالم، لكنها تساهم بنسبة 22% في التبخُّر والنَّتح على مستوى العالم[22]، الأمرُ الذي يؤكد أهميتها في الدورة فوق الإقليمية للمياه. عادةً ما تتراوح المسافات التي تقطعها الرطوبة المتبخرة من البرِّ عبر الغلاف الجوي قبل أن تتساقط مجدداً على الأرض ما بين 500 و5000 كيلومتر؛ وعادةً ما يستغرق النطاق الزمني لذلك ما بين 8 و10 أيام.[23-24] على سبيل المثال، تُعدُّ الرطوبة المتبخِّرة من برّ أوراسيا مسؤولةً عن 80% من موارد المياه في الصين.[11] أما المصدر الرئيسي للأمطار في حوض الكونغو فهو الرطوبة المتبخرة فوق شرق أفريقيا، وتُعد مياه حوض نهر الكونغو بدورها مصدراً رئيسياً للرطوبة المسببة لهطول الأمطار في منطقة الساحل.[11] أما حالة الغابة المطيرة في غرب أفريقيا



الشكل 3: تنقل الأنهار الطيارة بخارَ الماء مسافاتٍ طويلةً تكسوها الغابات التي تلعب دوراً أساسياً في تكوُّن هذا البخار، فهي بمثابة مضخة ماءٍ عملاقة تمتص مليارات الليترات من الماء وتطلِقها على شكل رطوبة.

المخطط البياني: معدّل من *Pearce72*. إعادة الطبع بإذن من الجمعية الأمريكية لتقدم العلوم (*AAAS*).

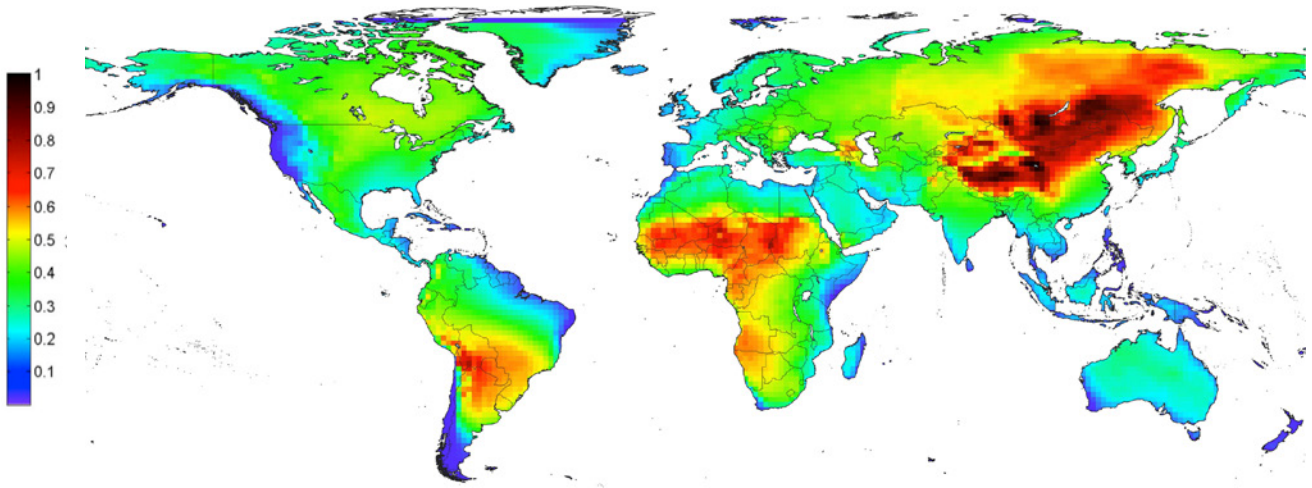
فهي هامة بصورةٍ خاصةٍ من أجل تدفق نهر النيل.[25] وهذا ما يفسِّر شدَّة تأثُّر الهطول بالتغيرات التي تطرأ على استخدام الأراضي الواقعة خارج أحواض الأنهار أكثر من تلك الواقعة داخلها، حتى في أحواض الأنهار الكبرى ومنها الأمازون والكونغو واليانغستي. وحتى في أحواض الأنهار التي لا تمتدُّ عبر عدة بلدان، تأثرت معدلات التدفق بشكلٍ ملحوظٍ باستخدامات الأراضي الواقعة في بلدانٍ أخرى.[26]

تغيُّرات استخدام الأراضي، والتبدُّلات في تدفُّقات الحرارة

تُظهر النماذج أن التغيرات المحلية التي تحوِّل الغابات أو المروج إلى أراضٍ زراعيةٍ تخفض معدلات التبخُّر والنَّتح الأرضية السنوية لها بنسبة 30-40%.[27] وعلى مستوى العالم، سبَّبت التغيرات في الغطاء الأرضي في الفترة 1950 - 2000 انخفاضاً في معدلات التبخُّر والنَّتح الأرضية السنوية بنسبة 4-5%، أي ما يعادل 3000 - 3500 كيلومتر مكعب، وارتفاعاً في جريان المياه السطحية بنسبة 6.8%.[27، 28] من جهة أخرى، اكتشف العلماء أن لزيادة الغطاء النباتي تأثيراً مبرداً سببه تحسن فاعلية الحركة العمودية للحرارة وبخار الماء ما بين سطح الأرض والغلاف الجوي.[29]

التغيرات في نماذج الغلاف الجوي بسبب إزالة الغابات

تدلُّ مُشاهدات السَّواتل (الاقمار الاصطناعية) على أن للغابات تأثيراً كبيراً على تشكُّل السُّحُب، ولا يقتصر ذلك على المناطق المدارية فحسب، بل على المناطق المعتدلة أيضاً: قد يؤدي اختفاء الغابات إلى تناقصاتٍ ملحوظةٍ في الغطاء السَّحابي المحلِّي وبالتالي في كمية هطول المطر.[30] وقد تبيَّن بالنَّمذجة أن إزالة الغابات على نطاقٍ واسعٍ في العالم في خلال الفترة بين القرن الثامن عشر ومنتصف القرن التاسع عشر قد أدت إلى انخفاض في معدل الأمطار الموسمية لشبه القارة الهندية وجنوب شرق الصين، كما نجمَ عنها ضعفٌ في دوران الرياح الموسمية الآسيوية الصيفية.[31] وفي المناطق المدارية، طرأت تبدُّلاتٌ ملحوظة على الحِمل الرُّكامي العميق نتيجةً للتغيرات في الأماكن الطبيعية (ويتمثَّل معظمها في تحويل الغابات إلى أراضٍ زراعية). وهذا لا يؤثر على الهطول المحلي فحسب، بل يمتد أثره إلى مسافاتٍ بعيدة من خلال عملياتٍ تُعرَف باسم "الارتباطات المتباعدة". ومن الممكن أن يكون لهذه الارتباطات المتباعدة تأثيراتٌ على مناطق خطوط العرض الأعلى بما يغيِّر الطقس في تلك المناطق بشكلٍ ملحوظ.[33، 32، 25، 10] حتى إن اضطراباتٍ بسيطةً في الغطاء الأرضي في المناطق المدارية قد تؤثِّر على مناطق خطوط العرض الأعلى[34, 35] كما هي حال الارتباطات بين الأمازون وشمال غرب الولايات المتحدة مثلاً.[36] ويمكن أيضاً أن يسبب اختفاء الغابات هطول أمطار بمعدلات أقل ومواسم جفاف أطوَل على المستوى المحلي، مثلما حدث في رودونيا، البرازيل على سبيل المثال[37]، أو في بورنيو حيث لوحظ أن مستجمعات المياه التي تعرَّضت لأكبر فقدانٍ في الغابات قد شهدت انخفاضاً بنسبة 15% في كمية هطول المطر.[38] وفي الهند، كانت أنماط تناقص كمية هطول المطر في أثناء فترة الرياح الموسمية الهندية متوافقةً مع التغيرات في غطاء الغابات في الهند، ويعود ذلك إلى تناقص التبخُّر والنَّتح وما يتبع ذلك من تراجعٍ في عنصر الهطول المُعاد تدويره.[39] وهذا ما يوضِّح الأنماط الواسعة لتدفقات بخار الماء والهطول.



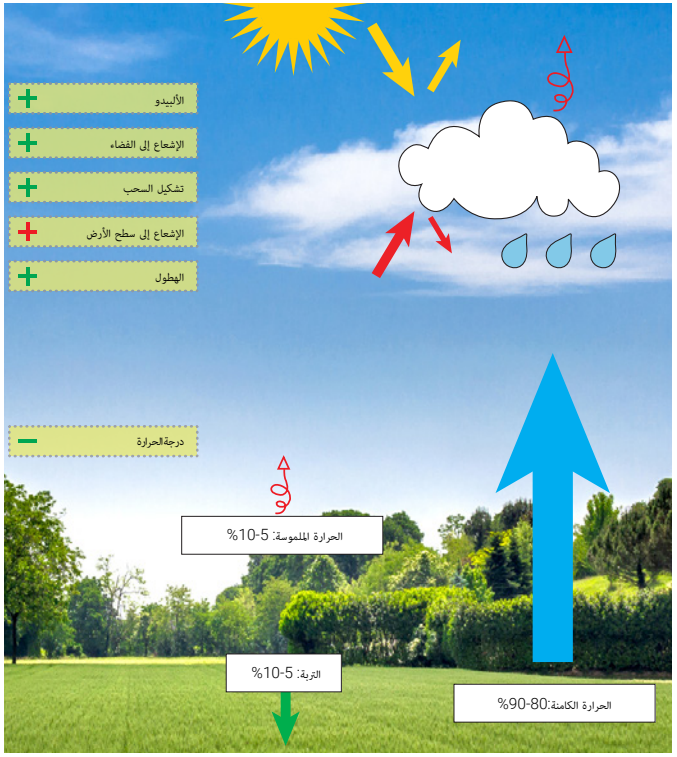
الشكل 4: متوسط نسبة إعادة تدوير الهطول القارّي (*1999 - 2008*). كلما كان الرقم أعلى، زادت كمية الهطول الناتجة عن تبخّر ونتح اليابسة.[11، 21]

إعادة الإشعاع من التربة الجرداء

في الأحوال العادية، يتحول أكثر من 50% من الإشعاع الشمسي الذي يبلغُ سطح الأرض إلى حرارة كامنة من خلال التبخُّر والنَّتح، وتنتقل هذه الحرارة الكامنة بدورها إلى الغلاف الجوِّي لتغذية دورة الهطول، وينعكس قسمٌ منها عائداً إلى الفضاء.

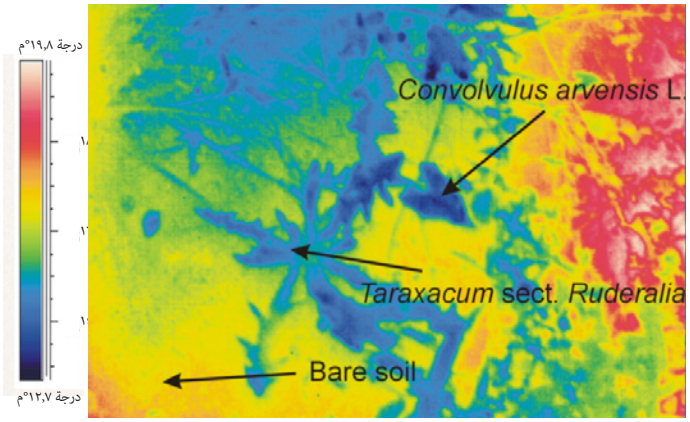
أما على الأسطح الجرداء، مثل الأراضي البور والمروج الجافة (في موسم الصيف وبعد حصاد القش)، وعلى الأسطح الاسمنتية أو الإسفلتية، ستمتص التربة كمية أكبر من الإشعاع الشمسي الوارد، فتسخن، وتولِّد حرارة محسوسة، وتنبعث منها إلى الغلاف الجوِّي طاقة حرارية بكمية متناسبة مع الأسِّ الرابع لحرارتها المُطلَقة (قانون ستيفان-بولتزمان) (**الشكل 5**، **الشكل 6**).

وقد تصل الاختلافات في درجات حرارة الأسطح ما بين هذه الأسطح الجرداء ومناطق الغابات، اعتماداً على وسط أوروبا كمثال، إلى 20°م في وقت العصر صيفاً (**الشكل 7**).[40] وفي جزيرة سومطرة الإندونيسية، وُجدَ أن الاختلافات في درجات الحرارة بين الغابة والأرض المقطوعة الأشجار قد تصل إلى 10°م، ويفسَّر ذلك مجدداً بتأثير التبخُّر المبرد للغابات، والذي يفوق تأثير البياض الاحترازي الصادر عن الأسطح الأدكن التي تغطيها الغابات.[41]



الشكل 5: يقلِّل التبخُّر والنَّتح درجة حرارة الأرض ويزيد بياضَ السُّحب، وانعكاسَ الإشعاع إلى الفضاء في خلال عملية التكثُّف، وتشكيلَ السُّحب، وبالتالي يزيد الهطول. تؤدي إزالة الغطاء النباتي إلى ارتفاع درجة الحرارة على مستوى سطح الأرض، ومع ارتفاع حرارة الأرض تزيد الطاقة الحرارية الأرضية بطريقة أُسِّيَّة، مكوِّنةً مناطق ضغطٍ مرتفعٍ تعوق مرورَ الكتل الهوائية (وبالتالي الرطوبة) ذات الضغط المنخفض، وتقلِّل فرصَ تشكُّل السُّحب وبالتالي تخفِّض الهطول

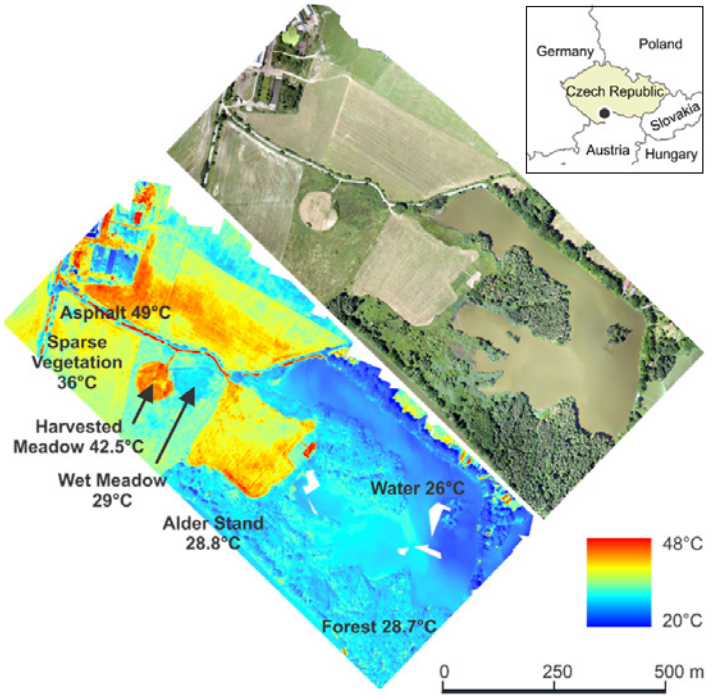
المخطط البياني: استيفان شوارتزر، برنامج الأمم المتحدة للبيئة/غريد-جنيف



الشكل 6: البقعة نفسها من التغطية النباتية المتناثرة وقد صُوِّرت بطيف الأشعة تحت الحمراء وطيف الأشعة المرئية. يظهر السطح العاري للأرض أسخن من سطح الأوراق التي يبرِّدها النَّتح.[9]

وهذا ما يبيِّن حقيقةَ أن العمليات البيوفيزيائية المحلية التي يُطلقها فقدان الغابات يمكنها رفع درجات الحرارة صيفاً بشكلٍ فعال في مناطق العالم كافةً.[42]

وبالفعل، أدت إزالة الغابات في الماضي إلى خفض تدفق الحرارة الكامنة إلى اليابسة ورفع الحرارة المحسوسة على الأرض.[43-47] وقد سبَّبت إزالة الغابات احتراراً ملحوظاً في خلال العقد الممتد من عام 2003 إلى عام 2013 بمقدار يصل إلى 0.28°م على متوسط اتجاهات الحرارة في المناطق المدارية، واحتراراً شديداً يصل إلى 0.32°م في المناطق المعتدلة الجنوبية.[48] ومع المعدل الحالي لإزالة الغابات، من الممكن أن يضيف فقدان الغابات المدارية 1.5°م إلى



الشكل 7: توزُّع الحرارة السطحية في الأماكن الطبيعية المختلطة.[14، 40]

درجات الحرارة العالمية بحلول عام 2100، بمعزلٍ عن ارتفاعات درجة الحرارة الأخرى الناجمة عن فعل البشر.[49]

بين العامين 1950 و2000، ارتفعت درجة الحرارة السطحية عالمياً بمقدار 0.3°م بسبب التغيرات في الغطاء الأرضي.[27] أما الاضطرابات في توازن الطاقة السطحية بسبب تغيرات الغطاء النباتي بين العامين 2000 و2015 فقد سببت ارتفاعاً متوسطه 0.23°م في درجة الحرارة السطحية المحلية في أماكن حدوث تلك التغيرات في الغطاء النباتي.[50] وقد يفسّر الاحترار الوسطيّ الناجم عن تغيرات الغطاء النباتي 18-40% من توجُّهات الاحترار العالمية الحالية، وذلك من خلال انخفاض التبخُّر والنَّتح على الرغم من زيادة البياض السطحي.[42، 51، 52]

دور الأهباء البيولوجية المنشأ في تشكُّل السُّحب

لا تقتصرُ أهمية الغابات على تدفقات الطاقة وتوليد الهطول فحسب، إذ يبدو أن الغابات الكبيرة هي بمثابة مُفاعلاتٍ بيوجيوكيميائية يجري فيها إنتاج النُّوى من أجل تشكل السُّحب والهطول من خلال عمليات الكيمياء الضوئية للغلاف الحيوي والغلاف الجوي، وبالتالي تحافظ على الدورة الهيدرولوجية.[53] تُنتج الأشجار مركبات عضوية طيَّارة و"تُطلِق" كائنات مجهرية - بكتيريا وأبواغ فطرية وغبار طلع وغيرها من المخلفات البيولوجية - تعيش على الأوراق وتنتقل عبر الهواء في أثناء هطول المطر وبعده في النظم الإيكولوجية للغابات.[54-57] وهي تشكل جزءاً هاماً من نويَّات تكثُّف السُّحب والنويَّات الجليدية في الغلاف الجوي، والتي تؤثر بدورها على تشكُّل السُّحب والهطول.[53، 54، 57-59] كما يمكن أن تساعد الأهباء البيولوجية المنشأ في رفع درجة حرارة التجمُّد من خلال تكوين النويَّات الجليدية. ومن دون هذه الظاهرة لا يمكن حدوث التجمُّد قبل وصول درجة حرارة السُّحب إلى -15°م أو أدنى؛ لكن بفضل هذه النويَّات الجليدية، يمكن إنجاز العملية في درجات حرارة تقارب 0°م، مما يتيح التشكُّل الفعال للسُّحب وإنتاج الأمطار محلياً بسهولة أكبر.[59-62]

حقوق الصورة: *Shutterstock.com*

حقوق الصورة: *Shutterstock.com*

المحيطات، وسيطٌ مخفِّفٌ في الاتجاهين

تمتص المحيطات وتخفِّف حوالي ثُلث انبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية المنشأ وما يفوق 90% من الحرارة الإضافية البشرية المنشأ المنبعثة إلى الغلاف الجوِّي. وعند الحديث عن ارتفاع الحرارة عالمياً، ينبغي إدراك أننا لا نرى سوى 10% تقريباً من التأثير الكلِّي.[63، 64]

كما يحدث تخفيف ثاني أكسيد الكربون من قِبل المحيطات بالاتجاه المعاكس أيضاً: فعندما نسحب ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي بهدف تقليل تركيزاته في الغلاف الجوي، ستُصدر المحيطات ثاني أكسيد الكربون من جديد بسبب الاختلاف الجديد في الضغط الغازي، في محاولةٍ لاستعادة توازن تركيزات ثاني أكسيد الكربون بين الغلاف الجوِّي والمحيط. بذلك سيصعُب التوصُّل إلى انخفاضٍ سريعٍ لكمية ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على مرّ فترات زمنية قصيرة حتى إذا نجحنا في أ) إيقاف انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وَ ب) ابتكار حلول طبيعية أو تقنية لتثبيت ثاني أكسيد الكربون.

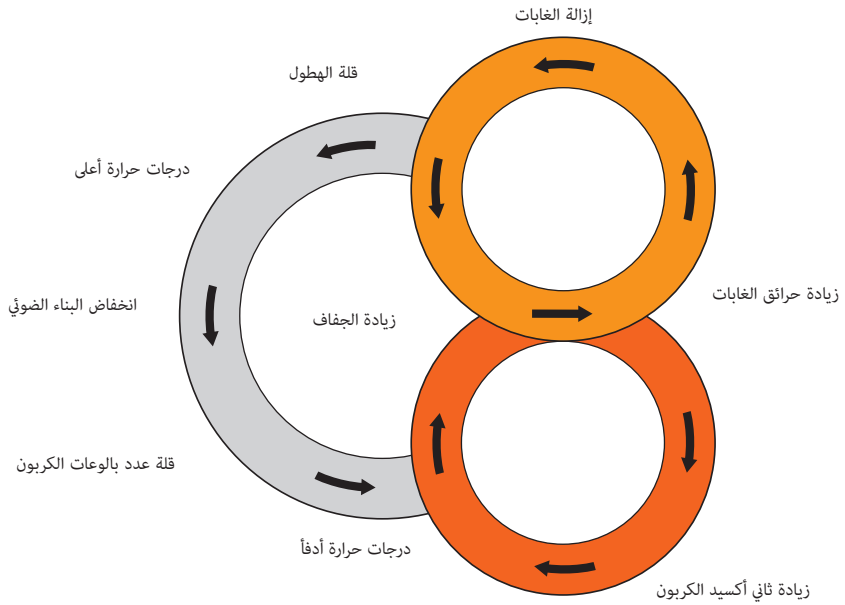
ما هي الآثار المترتبة على السياسات؟

يجب الاعتراف بدورِ الغطاء النباتي والتربة الخصبة والقدرة على الاحتفاظ بالمياه كعوامل منظمة أساسية لدورات المياه والطاقة والكربون. نورد في ما يلي بعض الآثار المترتبة على السياسات

- الانتباه إلى **حلقات التأثير التفاعلي الإيجابي**: كما شُرحَ آنفاً، عندما تُقطَع أشجار الغابات، تزيد أسطح اليابسة والمناخ جفافاً واحتراراً. وتنجم عن ذلك ظروفٌ تُفاقم خطر اندلاع حرائق الغابات والنباتات التي تسبب انبعاث مزيدٍ من ثاني أكسيد الكربون ومزيداً من إزالة الغابات، مشكِّلةً حلقةً مفرغة.[68، 69] يكوِّن تغير المناخ وإزالة الغابات والجفاف وحرائق الغابات حلقةً ثلاثيةً من التأثيرات التفاعلية المُعزِّزة (**الشكل 8**).
- نظراً للارتباطات المتباعدة بين النظم الإيكولوجية للغابات الكبيرة، ينبغي اعتبارها مصدراً **لمنافع عالمية** . على سبيل المثال، يمكن أن تقدِّم آلية خفض الانبعاثات الناجمة عن إزالة الغابات وتدهورها (REDD+)، التي أُعدَّت بموجب اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ (UNFCCC)، نموذجاً للإقرار بالخدمات الدولية التي توفرها هذه الغابات في مجال المياه والطاقة، وتمويلها.
- ينبغي حماية **مناطق الغابات الحساسة** والتي تستأثر بأهمية خاصة، وإدارتها وفقاً لذلك.
- من الأهمية القصوى القضاء على **إزالة الغابات** وتكثيف جهود **إعادة التشجير** في كل أنحاء العالم.
- ينبغي تركيز الممارسات الزراعية على **بناء التربة**، و**تغطية التربة** بالنباتات على مدار السنة واستخدام وسائل **الحِراجة الزراعية** [ج].

حقوق الصورة: *Shutterstock.com*

[ج] الحراجة الزراعية هي إدماج الأشجار أو الجنبات بالحقول الزراعية والمراعي.



الشكل 8: نظراً لطبيعة العلاقات المتداخلة بين حرائق الغابات، وإزالة الغابات، والجفاف، وتغير المناخ، لا يمكن شرحُ مدى تعقيد هذا الكيان المترابط من خلال عزلِ إحدى تلك العمليات عن سواها.[65-67]

الخاتمة

من المهمِّ فهُم الاقتران الوثيق بين اليابسة ودورات الكربون والمياه والطاقة. ومن الأهمية البالغة إعادة تأسيس دورات الرطوبة الجوية والأرضية في الغطاء النباتي والتربة والغلاف الجوي من أجل تبريد الكوكب وتثبيت نماذج الهطول في مختلف أرجاء العالم. فإذا فشلنا سيكون الثمنُ جفاف الأماكن الطبيعية الأرضية.

ولا بدَّ من القضاء على إزالة الغابات، وتكثيف إعادة التشجير، وتنفيذ ممارسات الحِراجة الزراعية إذا أردنا النجاح في تفادي كارثةٍ مناخية. ينبغي تبني نهج التفكير وفق الأنظمة بُغية فهم النماذج الكامنة لتشكُّل الأمطار، واستخدامها. من أجل إعادة الأمطار إلى مناطق مثل "السَّاحل"، لا يكفي أن نزرع الأشجار في المنطقة؛ بل سيتطلب الأمر إعادة بناء الغابات بدءاً من ساحل المحيط من أجل سحب الهواء الرطب من المحيط إلى داخل اليابسة.[70]

وفي الوقت نفسه، يُعدُّ تحسين خصوبة التربة واحتفاظها بالماء، وحماية التربة من خلال ممارسات الحركة العضوية التجديدية (راجع موجزات التبصُّر 010 و 013 الصادرة عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة)، مثل توفير الغطاء النباتي على مدار السنة من خلال محاصيل التغطية والبَذر المُظلِّل أو تطبيق الحِراجة الزراعية، نهجاً هاماً آخرَ لتغذية دورات المياه والطاقة. ومن أهم مقومات النجاح بالنسبة إلى المناطق الواسعة الخاضعة للزراعة حالياً في العالم، اكتشافُ وسائل لتكوين مزيدٍ من المادة العضوية في التربة.

بشكلٍ عام، نحن في أمسّ الحاجة إلى إحداث نقلة نوعية بحيث نقدِّر حقَّ تقديرٍ ما يتمتع به الغطاء النباتي عامةً، والغابات خاصةً، من تأثيراتٍ هيدرولوجية ومبرِّدة للمناخ، فضلاً عن قدرتها على احتجاز الكربون. فتأثيرات الغطاء النباتي - وخاصةً الشَّجري - على المناخ على المستويات المحلية والإقليمية والقارية توفِّر منافع تستحقُّ منّا اعترافاً أفضل بها.[14، 32، 71]

شكر وتقدير

المؤلفون

Stefan Schwarzer، برنامج الأمم المتحدة للبيئة/غريد-جنيف وَجامعة جنيف

المراجعون

الخارجيون

David Ellison، جامعة بيرن

البروفيسور Douglas Sheil، جامعة فاهنينيغين

Lera Miles، المركز العالمي لرصد حفظ الطبيعة التابع لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP-WCMC)

Eleanor Milne، جامعة كولورادو الحكومية

المراجعون من برنامج الأمم المتحدة للبيئة

أنجيلين دجامبو، بارنابا ديكسون، غابرييل لابات، جين موريثي، كايسا أوسيما، ماجدا بيسيادا، باسكال بيدوتسي، راشيل كوص، صمويل أوبيو، تيم كريستوفرسن، فرجينيا جيتاري، بينغ وانغ

فريق موجزات التبصُّر الصادرة عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة

Alexandre Caldas، وSandor Frigyik، وAudrey Ringler، وEsther Katu، وErick Litswa، وPascil Muchesia.

مستوحى من كلمةٍ ألقاها Walter Jehne

إخلاء المسؤولية

التعيينات المستخدَمة وطريقة تقديم المواد لا تعني ضمناً الإعراب عن أي رأيٍ مهما كان من جانب برنامج الأمم المتحدة للبيئة أو الوكالات المتعاونة معه في ما يتعلق بالوضع القانوني لأي بلد أو إقليم أو مدينة أو منطقة أو سلطاتها، أو في ما يتعلق بتحديد تخومِها أو حدودها.

© الخرائط والصور والرسوم التوضيحية كما هو محدَّد فيها.

للاتصال

unep-foresight@un.org

قائمة المراجع

1- Pokorny, J. et al. Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. International Journal of Water 5, 311 (2010).

2- Jasechko, S. *et al.* Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* **496**, 347–350 (2013).

3- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. & Kiehl, J. Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* **90**, 311–324 (2009).

4- Wang, K. & Dickinson, R. E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability: GLOBAL TERRESTRIAL EVAPOTRANSPIRATION. *Reviews of Geophysics* **50**, (2012).

5- Ellison, D., Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. & van Noordwijk, M. Upwind forests: managing moisture recycling for nature-based resilience. *Unasylva* **70**, 13 (2019).

6- Schneider, U. *et al.* Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). *Atmosphere* **8**, 52 (2017).

7- Schlesinger, W. H. & Jasechko, S. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* **189–190**, 115–117 (2014).

8- Wei, Z. *et al.* Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration: Revisiting Global ET Partitioning. *Geophysical Research Letters* **44**, 2792–2801 (2017).

9- Kravčík, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kovář, M. & Tóth, E. Water for the Recovery of the Climate - A New Water Paradigm. 94 (2007).

10- Mahmood, R. *et al.* Land cover changes and their biogeophysical effects on climate: LAND COVER CHANGES AND THEIR BIOGEOPHYSICAL EFFECTS ON CLIMATE. *International Journal of Climatology* **34**, 929–953 (2014).

11- van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaefli, B. & Steele-Dunne, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research* **46**, (2010).

12- Crowther, T. W. *et al.* Mapping tree density at a global scale. *Nature* **525**, 201–205 (2015).

13- FAO. *State of the world's forests 2012*. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012).

14- Ellison, D. *et al.* Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* **43**, 51–61 (2017).

15- Pokorny, J. What can a tree do? (2012).

16- Weng, W., Luedeke, M. K. B., Zemp, D. C., Lakes, T. & Kropp, J. P. Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **22**, 911–927 (2018).

17- Nobre, A. D. The Future Climate of Amazonia. 42 (2014).

18- Eltahir, E. A. B. & Bras, R. L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **120**, 861–880 (1994).

19- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L. & Gordon, L. J. Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service. *PLOS ONE* **11**, e0151993 (2016).

20- Staal, A. *et al.* Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change* **8**, 539–543 (2018).

21- van der Ent, R. J. A new view on the hydrological cycle over continents. (2014).

22- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J. & Savenije, H. H. G. Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land. *Earth System Dynamics* **5**, 441–469 (2014).

23- van der Ent, R. J. & Savenije, H. H. G. Length and time scales of atmospheric moisture recycling. *Atmospheric Chemistry and Physics* **11**, 1853–1863 (2011).

24- van der Ent, R. J. & Tuinenburg, O. A. The residence time of water in the atmosphere revisited. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **21**, 779–790 (2017).

25- Gebrehiwot, S. G. *et al.* The Nile Basin waters and the West African rainforest: Rethinking the boundaries. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* **6**, e1317 (2019).

26- Wang-Erlandsson, L. *et al.* Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrology and Earth System Sciences* **22**, 4311–4328 (2018).

27- Sterling, S. M., Ducharne, A. & Polcher, J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change* **3**, 385–390 (2013).

28- Gordon, L. J. *et al.* Human modification of global water vapor flows from the land surface. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **102**, 7612–7617 (2005).

29- Chen, C. *et al.* Biophysical impacts of Earth greening largely controlled by aerodynamic resistance. *Sci. Adv.* **6**, eabb1981 (2020).

30- Teuling, A. J. *et al.* Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. *Nature Communications* **8**, (2017).

31- Takata, K., Saito, K. & Yasunari, T. Changes in the Asian monsoon climate during 1700-1850 induced by preindustrial cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **106**, 9586–9589 (2009).

32- Pielke, R. A. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus Convective rainfall. *Reviews of Geophysics* **39**, 151–177 (2001).

33- Sheil, D. & Murdiyarso, D. How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis. *BioScience* **59**, 341–347 (2009).

34- Chase, T. N., Pielke Sr., R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate Dynamics* **16**, 93–105 (2000).

35- Chase, T. N., Pielke, R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. & Running, S. W. Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **101**, 7393–7408 (1996).

36- Medvigy, D., Walko, R. L., Otte, M. J. & Avissar, R. Simulated Changes in Northwest U.S. Climate in Response to Amazon Deforestation*. *Journal of Climate* **26**, 9115–9136 (2013).

37- Coe, M. T. *et al.* The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. *Tropical Conservation Science* **10**, 194008291772067 (2017).

38- McAlpine, C. A. *et al.* Forest loss and Borneo's climate. *Environmental Research Letters* **13**, 044009 (2018).

39- Paul, S. *et al.* Weakening of Indian Summer Monsoon Rainfall due to Changes in Land Use Land Cover. *Scientific Reports* **6**, (2016).

40- Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J. & Rejšková – Procházková, A. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate. *Ecological Engineering* **54**, 145–154 (2013).

41- Sabajo, C. R. *et al.* Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia. *Biogeosciences* **14**, 4619–4635 (2017).

42- Alkama, R. & Cescatti, A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science* **351**, 600–604 (2016).

43- Bounoua, L., Defries, R., Collatz, G. J., Sellers, P. & Khan, H. Effects of Land Cover Conversion on Surface Climate. 36 (2002).

44- Brovkin, V. *et al.* Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics* **26**, 587–600 (2006).

45- Pitman, A. J. *et al.* Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study. *Geophysical Research Letters* **36**, (2009).

46- Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T. & Claussen, M. Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change: CLIMATE EFFECTS OF HISTORICAL LAND COVER CHANGE. *Geophysical Research Letters* **37**, (2010).

47- Zhao, M., Pitman, A. J. & Chase, T. The impact of land cover change on the atmospheric circulation: *Climate Dynamics* **17**, 467–477 (2001).

48- Li, Y. *et al.* Potential and Actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature: IMPACTS OF FOREST CHANGE ON TEMPERATURE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **121**, 14,372-14,386 (2016).

49- Mahowald, N. M., Ward, D. S., Doney, S. C., Hess, P. G. & Randerson, J. T. Are the impacts of land use on warming underestimated in climate policy? *Environmental Research Letters* **12**, 094016 (2017).

50- Duveiller, G., Hooker, J. & Cescatti, A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications* **9**, (2018).

51- Ban-Weiss, G. A., Bala, G., Cao, L., Pongratz, J. & Caldeira, K. Climate forcing and response to idealized changes in surface latent and sensible heat. *Environmental Research Letters* **6**, (2011).

52- Wolosin, M. & Harris, N. Tropical Forests and Climate Change: The Latest Science. *World Resources Institute* 14 (2018).

53- Poschl, U. *et al.* Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon. *Science* **329**, 1513–1516 (2010).

54- Bigg, E. K., Soubeyrand, S. & Morris, C. E. Persistent after-effects of heavy rain on concentrations of ice nuclei and rainfall suggest a biological cause. *Atmospheric Chemistry and Physics* **15**, 2313–2326 (2015).

55- Bowers, R. M. *et al.* Characterization of Airborne Microbial Communities at a High-Elevation Site and Their Potential To Act as Atmospheric Ice Nuclei. *Applied and Environmental Microbiology* **75**, 5121–5130 (2009).

56- Conen, F., Eckhardt, S., Gundersen, H., Stohl, A. & Yttri, K. E. Rainfall drives atmospheric ice-nucleating particles in the coastal climate of southern Norway. *Atmospheric Chemistry and Physics* **17**, 11065–11073 (2017).

57- Joung, Y. S., Ge, Z. & Buie, C. R. Bioaerosol generation by raindrops on soil. *Nature Communications* **8**, (2017).

58- Després, VivianeR. *et al.* Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* **64**, 15598 (2012).

59- Morris, C. E. *et al.* Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere. *Global Change Biology* **20**, 341–351 (2014).

60- Christner, B. C., Morris, C. E., Foreman, C. M., Cai, R. & Sands, D. C. Ubiquity of Biological Ice Nucleators in Snowfall. *Science* **319**, 1214–1214 (2008).

61- Lazaridis, M. Bacteria as Cloud Condensation Nuclei (CCN) in the Atmosphere. *Atmosphere* **10**, 786 (2019).

62- Morris, C. E., Soubeyrand, S., Bigg, E. K., Creamean, J. M. & Sands, D. C. Mapping Rainfall Feedback to Reveal the Potential Sensitivity of Precipitation to Biological Aerosols. *Bulletin of the American Meteorological Society* **98**, 1109–1118 (2017).

63- Cheng, L. *et al.* Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences* **37**, 137–142 (2020).

64- Pörtner, H.-O. *et al.* IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Summary for Policymakers. (2019).

65- Hasler, N., Werth, D. & Avissar, R. Effects of Tropical Deforestation on Global Hydroclimate: A Multimodel Ensemble Analysis. *Journal of Climate* **22**, 1124–1141 (2009).

66- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N. & Dolman, A. J. Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics: CLIMATE CONTROLS ON FIRES. *Global Biogeochem. Cycles* **22**, n/a-n/a (2008).

67- Zhao, M. & Running, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science* **329**, 940–943 (2010).

68- *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Cambridge University Press, 2012). doi:10.1017/CBO9781139177245.

69- International Union of Forest Research Organizations. Global Fire Challenges in a Warming World. (2018).

70- Ellison, D. & Speranza, C. I. From blue to green water and back again: Promoting tree, shrub and forest-based landscape resilience in the Sahel. *Science of The Total Environment* **739**, 140002 (2020).

71- Lemordant, L., Gentine, P., Swann, A. S., Cook, B. I. & Scheff, J. Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrologic cycle in response to increasing CO_2. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **115**, 4093–4098 (2018).

72- Pearce, F. A controversial Russian theory claims forests don't just make rain—they make wind. Science | AAAS https://www.sciencemag.org/news/2020/06/controversial-russian-theory-claims-forests-don-t-just-make-rain- they-make-wind (2020).

للاطّلاع على الإصدارات الحالية والسابقة عبر الإنترنت وتنزيل موجزات التبصُّر الصادرة عن برنامج الأمم المتحدة للبيئة، يرجى زيارة

https://wesr.unep.org/foresight

WESR
WORLD ENVIRONMENT SITUATION ROOM

الإنذار المبكر والقضايا الناشئة والمستقبلية