

ÍNDICE

Prólogo	17
Tema 1. Biotecnología	19
1.1. ¿Qué es la Biotecnología?	21
1.2. Una larga historia para una tecnología de moda	22
1.3. La revolución Biotecnológica del siglo xx	23
1.4. La Ingeniería Genética: nuevas herramientas para la Biotecnología	25
1.5. Biotecnología tradicional y Biotecnología actual	28
1.6. Organismos modificados genéticamente	31
1.7. Campos de aplicación de la nueva Biotecnología	32
1.8. Repercusiones económicas de la Biotecnología	33
1.9. Los protagonistas de la Biotecnología	34
1.9.1. Las bacterias	34
1.9.2. Los hongos	37
1.10. El futuro de la Biotecnología	39
Bibliografía	41
Tema 2. Alimentos y Biotecnología	43
2.1. La disponibilidad de alimentos	45
2.2. Historia de la alimentación	45
2.2.1. Primeros alimentos	45
2.2.2. Inicios de la agricultura	46
2.2.3. La revolución verde	47
2.2.4. La nueva revolución: cultivos genéticamente modificados	48
2.3. Alimentos y Biotecnología	49

2.4.	Alimentación y nutrición	50
2.5.	Nutrientes	51
2.5.1.	Hidratos de carbono	51
2.5.2.	Grasas	52
2.5.3.	Proteínas	52
2.5.4.	Vitaminas	53
2.5.5.	Minerales	55
2.6.	Digestión de los alimentos	57
2.7.	Comemos genes cuando ingerimos alimentos	58
2.8.	Tipos de alimentos	59
2.8.1.	Por su origen	59
2.8.2.	Por su elaboración	59
2.8.3.	Por su consumo	59
2.8.4.	Clasificación tradicional	61
2.9.	Dieta y requerimientos nutricionales	63
2.10.	Conservación de los alimentos	65
2.10.1.	Métodos físicos	65
2.10.2.	Métodos químicos	66
2.10.3.	Métodos biológicos	69
2.11.	Alimentación y salud	70
2.11.1.	Enfermedades relacionadas con la alimentación	70
2.11.2.	Enfermedades de origen alimentario	72
2.12.	Problemas de la alimentación mundial	74
2.12.1.	Escasez de alimentos	74
2.12.2.	Contaminación de los alimentos	75
2.12.3.	Problemas ambientales generados por la producción de alimentos	75
2.13.	Nuevos alimentos y alimentos modificados genéticamente ...	75
2.13.1.	La tecnología enzimática y biocatálisis	76
2.13.2.	Alimentos genéticamente modificados	78
2.13.3.	Técnicas para la detección de contaminantes y fraude alimentario	79
	Bibliografía	81
Tema 3.	DNA, genes y genomas	89
3.1.	¿Qué es el material genético?	91
3.2.	¿Qué es un gen?	92
3.3.	Estructura del DNA: la doble hélice	94
3.4.	El lenguaje de los genes	97
3.5.	El DNA se autorreplica	99

3.6. Los errores en el DNA: mutaciones	102
3.7. DNA y genes	103
3.8. Genes y cromosomas	104
3.9. Genes y genomas	106
Bibliografía	109

Tema 4. Del gen a la proteína

111

4.1. La información genética se materializa en las proteínas	113
4.2. Las proteínas	114
4.3. Del gen a la proteína	117
4.4. Un intermediario: el RNA	118
4.5. Un diccionario molecular: el código genético	120
4.6. Síntesis de proteínas: traducción	122
4.7. Cambios en los genes: mutaciones	124
4.8. Consecuencias de las mutaciones	125
4.9. Regulación de los genes: activación y represión	126
4.10. Arquitectura de un gen	128
Bibliografía	129

Tema 5. Ingeniería genética

131

5.1. La ingeniería genética	133
5.1.1. Cortar un gen y separarlo del resto del genoma	134
5.1.2. Unir el gen a un vector que lo transporte al interior de una célula hospedadora	134
5.1.3. Introducir el gen en la bacteria y establecer un clon o linaje de bacterias que lo reproduzcan y, en su caso, obtener el producto del gen	135
5.2. Algunas aplicaciones de la ingeniería genética	136
5.3. Las herramientas y las técnicas de la ingeniería genética	138
5.4. Enzimas de restricción	139
5.5. Otras enzimas	140
5.6. Vectores	143
5.6.1. Plásmidos	143
5.6.2. Virus bacteriófagos	146
5.6.3. Cósmidos	147
5.6.4. Otros vectores	148
5.7. Introducción en la célula hospedadora	148

5.8. Células hospedadoras	150
5.8.1. Las bacterias como hospedadoras	150
5.8.2. Las levaduras como hospedadoras de genes	152
5.8.3. Levaduras más utilizadas en ingeniería genética	152
5.8.4. Procesos de transformación en levaduras	154
5.8.5. Vectores específicos de levaduras	154
5.8.6. Células vegetales y células animales	156
5.9. Técnicas para trabajar con genes	158
5.10. Electroforesis	158
5.11. Hibridación con sondas	160
5.12. Secuenciación del DNA	163
5.13. Reacción en cadena de la polimerasa (PCR)	167
5.14. Biochips	172
Bibliografía	175

Tema 6. Microorganismos y alimentos fermentados 177

6.1. Microbiología de los alimentos fermentados	179
6.2. Producción de pan	181
6.3. Mejora de la levadura panadera por ingeniería genética	182
6.4. Producción de vinos y cavas	184
6.5. Levaduras vínicas transgénicas	186
6.6. La producción de cerveza	187
6.7. Levaduras cervceras modificadas genéticamente	189
6.8. Producción de bebidas alcohólicas destiladas	191
6.9. Productos lácteos	192
6.9.1. El yogur y las leches fermentadas	192
6.9.2. Los quesos	193
6.10. Biotecnología de las bacterias lácticas	193
6.11. Fermentaciones cárnicas	195
6.12. Productos vegetales fermentados	196
6.13. Microorganismos productores de enzimas para la industria alimentaria	198
6.14. Los microorganismos como alimento	200
Bibliografía	201

Tema 7. Microorganismos genéticamente modificados. Su aplicación en los alimentos y sus potenciales efectos sobre la salud y nutrición del hombre	203
7.1. Aplicación de la tecnología transgénica a los microorganismos empleados en la alimentación	205
7.1.1. Cultivos iniciadores bacterianos	205
7.1.2. Levaduras y hongos filamentosos	206
7.2. Microorganismos genéticamente modificados viables en los alimentos	207
7.3. Enzimas alimentarias de origen microbiano producidas por MGM	210
7.4. Otros componentes de los alimentos producidos por MGM ..	212
7.4.1. Aromas	212
7.4.2. Aditivos alimentarios	212
Ácidos orgánicos	212
7.5. Consecuencias e impacto del uso de los MGMs en alimentos	214
7.5.1. Interacciones con la microflora humana	214
7.5.2. Transferencia génica entre microorganismos asociados al intestino y asociados a los alimentos	217
7.5.3. El caso concreto del triptófano	218
7.6. Aspectos reguladores	219
7.6.1. Métodos de evaluación de la seguridad de los MGMs de alimentos	219
7.6.2. MGMs viables en los alimentos	220
7.6.3. Los aspectos de la contención genética	221
7.6.4. Enzimas de alimentos	222
7.6.5. Saborizantes, aditivos y otros ingredientes de los alimentos	223
7.7. Lagunas en el conocimiento de los microorganismos	223
7.7.1. Alimentos fermentados	223
7.7.2. Las interacciones con la microflora del anfitrión	224
7.8. Conclusiones	224
Bibliografía	224
 Tema 8. La biotecnología en la agricultura: plantas transgénicas	 227
8.1. Importancia de las plantas para la alimentación	229
8.2. Unas bases de Botánica	230

8.3.	La modificación genética de las plantas	231
8.4.	Un poco de historia	234
8.5.	Estrategias para la modificación genética de plantas	235
8.5.1.	Cultivos de células vegetales	236
8.5.2.	Transformación de las células vegetales	237
8.5.3.	Diseño de la construcciones génicas	238
8.6.	Transferencia de genes con vectores específicos de plantas ..	239
8.6.1.	El plásmido Ti	239
8.6.2.	El plásmido Ri	241
8.6.3.	Vectores víricos	241
8.7.	Trasferencia directa de genes	241
8.8.	Expresión de genes exógenos en células vegetales	242
8.8.1.	Regiones reguladoras	242
8.8.2.	Genes marcadores	245
8.9.	Algunas aplicaciones de la ingeniería genética en plantas	246
8.10.	Mejora de las propiedades de los cultivos	247
8.10.1.	Aumento de la eficiencia del metabolismo de las plantas	247
8.10.2.	Aumento del valor nutritivo	248
8.10.3.	Maduración controlada de frutos y flores	249
8.10.4.	Resistencia a condiciones ambientales extremas	250
8.11.	Mejora del rendimiento. Cultivos resistentes a plagas, enfermedades y herbicidas	251
8.11.1.	Resistencia a plagas de insectos	251
8.11.2.	Resistencia a enfermedades víricas	253
8.11.3.	Resistencia a hongos y bacterias	253
8.11.4.	Resistencia a herbicidas	254
8.12.	Las plantas como factorías	255
8.12.1.	Producción de fármacos	256
8.12.2.	Producción de plásticos biodegradables	257
8.13.	Descontaminación ambiental	257
	Bibliografía	258

Tema 9. Animales transgénicos 261

9.1.	Métodos de transferencia de genes para la obtención de animales transgénicos	263
9.1.1.	Microinyección de DNA en ovocitos o microinyección pronuclear	264
9.1.2.	Otros métodos	268

9.1.3. Obtención de quimeras transgénicas por manipulación de embriones	268
9.2. Expresión de genes exógenos en animales transgénicos	269
9.3. Clonación del patrimonio genético de un organismo. Individuos clónicos	270
9.3.1. Métodos de clonación	271
9.3.2. Historia de la clonación	271
9.4. Aplicaciones de los animales transgénicos	275
9.4.1. Animales transgénicos en la industria cárnica: incremento de la producción	276
9.4.2. Mejora de razas con una mayor resistencia a las enfermedades	279
9.4.3. Modificación de la calidad de la leche	280
9.4.4. Producción de lana de oveja	281
9.4.5. Granjas farmacéuticas	282
9.4.6. Animales transgénicos como modelo para estudiar algunas enfermedades humanas	284
9.4.7. Xenotransplantes	285
9.5. Producción de peces transgénicos	285
9.5.1. Aumento del crecimiento: Mediante la sobreexpresión de la hormona del crecimiento	287
9.5.2. Mejora de la tolerancia al frío y resistencia a las heladas	287
9.5.3. Resistencia a las enfermedades.	288
9.5.4. Alteración del metabolismo	288
9.5.5. Esterilidad	288
9.5.6. Peces productores de fármacos	290
9.6. Beneficios y riesgos	290
9.6.1. Beneficios	290
9.6.2. Riesgos	291
9.6.3. Factores económicos y aceptación pública	292
Bibliografía	292

Tema 10. Técnicas moleculares aplicadas al análisis de alimentos y detección de fraudes alimentarios

10.1. Microorganismos patógenos en alimentos	297
10.2. Métodos de detección de microorganismos patógenos	299
10.3. Aplicación de las técnicas de Biología molecular para la identificación de patógenos en alimentos	301

10.4. Técnicas basadas en la hibridación con sondas de DNA	302
10.4.1. Hibridación en colonia	304
10.4.2. Southern-Blot	306
10.5. Reacción en Cadena de la Polimerasa (PCR)	307
10.5.1. Amplificación de secuencias de RNA por retrotrans- cripción y PCR (RT-PCR)	311
10.5.2. PCR anidada	312
10.6. Identificación de especies en los alimentos procesados	313
10.6.1. PCR-RFLP	315
10.6.2. PCR-SSCP	315
10.7. Identificación de alimentos preparados con plantas transgé- nicas	316
10.7.1. Detección de las secuencias reguladoras del transgén ...	317
10.7.2. Detección de los genes marcadores	317
10.7.3. Detección del gen foráneo	317
10.8. DNA-chips o microarrays	322
Bibliografía	323

Tema 11. Los alimentos transgénicos y la seguridad para la sa- lud

325

11.1. Los alimentos transgénicos	327
11.2. El concepto de seguridad en la biotecnología alimentaria	329
11.3. El principio de la equivalencia sustancial	331
11.4. La legislación en materia de protección al consumidor	333
11.4.1. La legislación en España y en la Unión Europea	333
11.4.2. La legislación internacional	342
11.5. El control de la seguridad	343
11.6. La percepción pública en materia de seguridad de los ali- mentos transgénicos	346
Bibliografía	349

Tema 12. Los alimentos transgénicos y la seguridad ambien- tal

355

12.1. El concepto de seguridad ambiental y su relación con los ali- mentos transgénicos	357
12.2. La legislación para la protección del trabajador	358

12.3. La legislación europea y nacional sobre la protección del medio ambiente	363
12.3.1. Directivas 90/219, 98/81 y 2009/41	364
12.3.2. Directivas 90/220 y 2001/18	364
12.3.3. La Ley de Bioseguridad española	365
Disposiciones generales	366
Competencias administrativas	367
Utilización confinada	367
Liberación voluntaria de OMG	368
Comercialización de OMG	368
Información y control	368
Obligaciones tributarias	369
Infracciones y sanciones	369
Órganos colegiales	369
12.3.4. Comisión Nacional de Bioseguridad	370
12.4. La legislación internacional	371
12.5. Percepción pública sobre los riesgos medioambientales de los alimentos transgénicos	372
Bibliografía	374

4.1. LA INFORMACIÓN GENÉTICA SE MATERIALIZA EN LAS PROTEÍNAS

La información genética de los organismos se encuentra almacenada en el DNA. En el tema anterior se han analizado algunas características excepcionales de esta molécula, como su estructura química, su mecanismo de copia y su organización dentro del núcleo celular. En este tema, vamos a profundizar en el estudio del gen para conocer los procesos mediante los cuales se expresa la información genética. Se trata de responder a dos preguntas: ¿cómo está codificada la información genética? ¿cómo se expresa esta información?

Los genes tienen la información en forma de instrucciones para el desarrollo de todos los caracteres del organismo. Todas nuestras características, desde los rasgos más básicos de nuestra pertenencia a los «humanos», hasta los detalles únicos que nos convierten en individuos diferentes, están influenciados en mayor o menor medida por nuestros genes. Pero, ¿cómo puede una molécula ejercer su acción en todas las características de un organismo?

Cuando uno piensa en caracteres se le ocurre, por ejemplo, algo tan complejo como la forma o el color de un ojo. La forma o el color de un ojo dependerá de las características del conjunto de células individuales que forman este órgano. Por tanto, la pregunta correcta en este momento es: ¿cómo determina el DNA las características de la célula? Ahora sí podemos responder a esta pregunta: **el DNA tiene la información para hacer todas las proteínas de la célula.**

Para seguir con nuestro razonamiento, es necesario recordar que todas las enzimas son proteínas. También sabemos que todas las actividades de la célula están sujetas al control directo de enzimas. Por lo tanto,

es obvio, que si el DNA determina la estructura de las proteínas, determina las enzimas que se producen en la célula. Ya que todas las reacciones químicas se desarrollan bajo la influencia de enzimas, todos los procesos celulares están, en última instancia, dependiendo de la información del DNA. En otras palabras, controlando la producción de proteínas el DNA controla también la producción de todas las demás sustancias celulares.

Las proteínas son la materia prima de la vida. Las partes de las células que no están hechas de proteínas, están hechas por proteínas. Incluso el propio mensaje genético del DNA, es producido y ensamblado con ayuda de proteínas.

De modo que, resumiendo, así es como funciona el flujo de información que mueve la vida:

- ◆ El DNA hace DNA, con nucleótidos, la ayuda de enzimas y su propia estructura como molde.
- ◆ El DNA también hace RNA, que es como una copia de trabajo o un intermediario del mensaje genético.
- ◆ El RNA, con la ayuda de una compleja maquinaria que traduce el mensaje, elabora proteínas.
- ◆ Las proteínas, especialmente las enzimas, hacen todo lo demás.

La biología en éstos últimos cincuenta años, desde el descubrimiento de la molécula de DNA, ha dado un paso de gigante en el conocimiento de los genes y de su funcionamiento.

4.2. LAS PROTEÍNAS

Son las moléculas más abundantes en las células, constituyendo aproximadamente el 50% de su peso seco. Se encuentran en todas las partes de la célula y son fundamentales para la estructura y función celular.

- ◆ **Prácticamente todas las funciones de los seres vivos dependen de las moléculas de proteínas.**

Existen millones de proteínas diferentes, cada una de ellas especializada en una función, y cada una de ellas específica para un organismo. Sin embargo, todas las moléculas que llamamos proteínas tienen muchos aspectos de su estructura química en común.

- ♦ **Las proteínas son grandes y largas moléculas compuestas por la unión de otras moléculas más sencillas llamadas aminoácidos. Por lo tanto, las proteínas son polímeros, donde los aminoácidos son las unidades que se repiten.**

Existen 20 aminoácidos diferentes. Todos ellos tienen una parte común en sus moléculas que consiste en un grupo amino y un grupo ácido y difieren unos de otros en la estructura del resto de la molécula que podemos denominar con carácter genérico como grupo R, que puede ser muy variado.

- ♦ **Los aminoácidos reaccionan unos con otros formando así largas cadenas con centenares de aminoácidos enlazados entre sí, esto es una proteína.** Este tipo de enlaces se denomina enlace peptídico, por eso a las proteínas se les denomina también a veces como péptidos o más frecuentemente polipéptidos, aunque este término es más correcto utilizarlo para denominar proteínas muy pequeñas o para fragmentos de proteínas.
- ♦ **Con los 20 tipos distintos de aminoácidos se construyen los millones de proteínas diferentes que existen en los seres vivos.** Una proteína difiere de otra en el orden o secuencia en que están situados los distintos aminoácidos y en el número total de éstos que contiene, que puede oscilar entre decenas, en las proteínas más pequeñas a miles en las más grandes. Un cálculo sencillo nos demuestra que para una proteína de un tamaño de cien aminoácidos, relativamente pequeña, existen 10^{130} posibilidades de ordenación de los veinte aminoácidos, es decir, nada menos que 10^{130} proteínas diferentes.
- ♦ **Lo que caracteriza a una proteína es el conjunto de aminoácidos que la forman y su ordenación relativa o secuencia. Es lo que se llama estructura primaria de la proteína.** Pero hay ciertas propiedades, sobre todo de tipo biológico, para cuya interpretación se requiere conocer la conformación espacial de la proteína. Cada proteína se repliega de una forma característica adquiriendo una estructura tridimensional propia (estructuras secundaria y terciaria) que condiciona su actividad biológica. Cuando una proteína pierde su conformación espacial se dice que está desnaturalizada. Esto es lo que ocurre cuando se calienta una proteína o cuando se introduce por ejemplo en alcohol. Así, al calentar hasta cocer un huevo, la albúmina, proteína de la clara, se desnaturaliza dando una masa blanca.

Como ya hemos indicado las proteínas tienen funciones muy importantes en los seres vivos, pero, además, tienen funciones muy diversas, es decir, **son moléculas muy versátiles**. Algunas proteínas tienen una **función contráctil**, como las proteínas del músculo, actina y miosina. Otras **funcionan como transportadoras**, como la hemoglobina, que transporta oxígeno y dióxido de carbono en la sangre. Otras tienen **función de defensa**, como las inmunoglobulinas que pueden reconocer e inactivar moléculas perjudiciales o dañinas para el organismo. Otras tienen un **papel estructural** como el colágeno de la piel o de los tendones. Otras proteínas realizan **funciones de información y alerta** para la célula, se encuentran en la superficie externa de la membrana y son capaces de detectar si existen virus rondando, si hay cambios en el ambiente, etc.

Pero, una de las funciones más impresionantes de las proteínas, y que puede resultar más desconocida, es su papel como aceleradores de las reacciones químicas que ocurren en los seres vivos. Las proteínas que están dedicadas a esta función se conocen con el nombre de **enzimas**. Una enzima puede acelerar la velocidad una reacción química del orden de cien millones de veces (10^8), lo que supone que una reacción que en presencia de una enzima dura un segundo, en su ausencia necesitaría tres años.

En la célula tienen lugar miles de reacciones por segundo, y cada una de ellas está controlada por una enzima. La actividad de las enzimas es la clave para entender todos los procesos de la vida. **La presencia de una enzima disminuye la cantidad de energía necesaria para que ocurra la reacción**. Una molécula que tiene este efecto sobre una reacción se denomina en el lenguaje de la química como catalizador. **Las enzimas se pueden definir como catalizadores biológicos**.

Como consecuencia, cuando interviene una enzima en una reacción se acelera la velocidad de la reacción. La mayoría de las reacciones procederían a velocidades imperceptibles en ausencia de enzimas, a las temperaturas normales de vida de los organismos.

Las enzimas son proteínas generalmente de un peso molecular elevado, es decir grandes moléculas formadas por numerosos aminoácidos. Por el contrario, la sustancia sobre la que actúan, que se denomina sustrato, suele ser una molécula pequeña.

Como ya hemos dicho, existen miles de enzimas diferentes en un organismo. Cada enzima tiene una estructura y también una función única. Las enzimas son muy **específicas** con respecto a la molécula sustrato y al tipo de reacción en la que van a intervenir. Prácticamente existe una enzima específica para cada una de las reacciones que tienen lugar en un ser vivo.

Muchas de las sustancias que se conocen vulgarmente como «venenos» actúan como inhibidores de la actividad de enzimas. Si estas enzimas actúan en reacciones vitales para la célula ésta muere. El efecto mortal del cianuro, de las sales de plomo, del mercurio, etc., es debido a que interaccionan con enzimas bloqueando su actividad.

Algunas enzimas necesitan para poder funcionar la presencia de otras sustancias químicas que pueden ser iones o bien pequeñas moléculas orgánicas. Muchas de las sustancias que conocemos con el nombre genérico de **vitaminas** tienen esta función. Por ejemplo, muchas vitaminas del grupo B (la B₁, B₂, B₆, B₁₂) actúan como coenzimas de determinadas enzimas.

4.3. DEL GEN A LA PROTEÍNA

El problema al que nos enfrentamos es el siguiente: ¿cómo es posible que la secuencia de bases del DNA dirija la formación de una proteína que, como acabamos de comentar, está constituida por una secuencia específica de aminoácidos?

Este proceso es todavía mucho más complejo de lo que pueda parecer a simple vista. De hecho, la transferencia de la información genética del DNA a las proteínas es el proceso bioquímico más complejo, más importante y más exquisitamente regulado de todos los que ocurren en la célula.

Aunque todavía quedan muchos aspectos por conocer, las etapas básicas de este proceso fueron desveladas en tan sólo una década (1955-1965), debido al trabajo de multitud de científicos que concentraron sus esfuerzos de una forma coordinada en este campo. Sus hipótesis, experimentos y razonamientos, son demasiado complicados y extensos como para detallarlos aquí. Por lo tanto, nos vamos a limitar a conocer la imagen final que emergió de todas estas investigaciones.

- ♦ **La idea básica es que el orden de aminoácidos de una proteína está dictado por el orden de las bases de un fragmento de DNA, es decir, de un gen.**

Este proceso no es directo. Sabemos que el DNA se encuentra siempre en el núcleo de la célula, y la síntesis de proteínas tiene lugar fuera del núcleo, en los ribosomas ubicados en el citoplasma. Por lo tanto, podemos concluir que debe existir una molécula intermediaria que actúe de «mensajero», llevando las instrucciones

para la síntesis de proteínas desde el DNA del núcleo hasta los ribosomas del citoplasma, y esta molécula es el ácido ribonucleico: RNA.

- ♦ **En el proceso de expresión de la información genética, tenemos, por tanto, dos etapas:**

DNA → RNA → proteínas

La primera etapa, el paso de la información del DNA al RNA se denomina **transcripción**. La segunda etapa, el paso de la información del RNA a la proteína, se denomina **traducción**. Vamos a estudiar estos procesos con algún detalle.

4.4. UN INTERMEDIARIO: EL RNA

El RNA es un ácido nucleico cuya estructura química es bastante parecida a la del DNA. Esta semejanza no es accidental ya que en la síntesis del RNA el DNA actúa como molde o modelo.

- ♦ **El RNA es la copia complementaria de un fragmento de DNA.**

Antes de estudiar cuál es el mecanismo por el que se realiza esta copia, conviene recordar la estructura del RNA y sus diferencias con el DNA.

El RNA está formado, también, por cuatro tipos de nucleótidos que se unen formando largas cadenas, en las que el azúcar y el fosfato forman el esqueleto sobre el cual sobresalen las bases.

Las diferencias con respecto al DNA son:

1. El azúcar en el RNA es la ribosa, ligeramente diferente a la desoxirribosa del DNA.
2. Una de las bases nitrogenadas es también diferente, en el RNA el uracilo (U) reemplaza a la timina (T).
3. El RNA es una cadena sencilla, mientras que el DNA es una doble hélice.
4. Las moléculas de RNA son mucho más pequeñas que las de DNA puesto que, como ya hemos indicado, son la copia de un fragmento de DNA.

♦ **El proceso de síntesis de RNA, que utiliza como molde un fragmento de una cadena de DNA, se denomina transcripción.**

El mecanismo es el siguiente: la doble hélice de DNA se abre, precisamente en la región que va a ser copiada. Es decir, las cadenas complementarias se separan por ruptura de los enlaces entre las bases que las mantenían unidas. Una de las cadenas de DNA sirve de molde para el alineamiento de los nucleótidos del RNA, de tal forma, que las bases del RNA que se sintetiza son complementarias a las de la cadena de DNA que se copia. De tal modo que, una G será copiada por una C, una C por una G, una T por una A, una A por una U (recuerde que el uracilo reemplaza a la timina). En el proceso de unión de los nucleótidos interviene una enzima: **la RNA polimerasa**. Al final del proceso la cadena de RNA queda libre y el DNA se cierra de nuevo por apareamiento de sus cadenas complementarias (Figura 4.1).

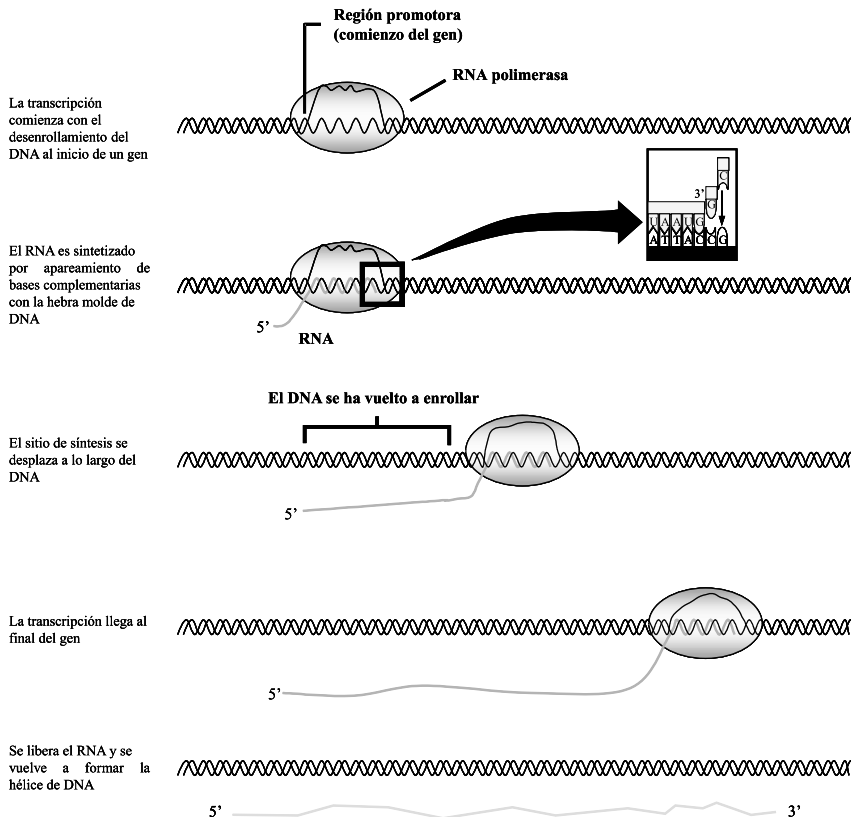


FIGURA 4.1. Proceso de transcripción. Se esquematizan las distintas etapas del proceso de transcripción de un gen o síntesis de RNA. En este proceso el molde es un segmento de una de las cadenas de DNA del gen.

De esta forma, las instrucciones genéticas copiadas o transcritas al RNA están listas para salir al citoplasma. El DNA, por tanto, es la «copia maestra» de la información genética, que permanece en «reserva» dentro del núcleo. El RNA, en cambio, es la copia de «trabajo» de la información genética.

- ♦ **El RNA que lleva las instrucciones para la síntesis de proteínas se denomina RNA mensajero (m-RNA).**

Hay otros tipos de RNA que, aunque también son copiados del DNA, no codifican proteínas. Estos tienen otras funciones muy importantes también en la síntesis de proteínas:

- ♦ **El RNA ribosómico (r-RNA)** constituye el ribosoma que es el lugar de la célula donde se realiza la síntesis de proteínas.
- ♦ **El RNA de transferencia (t-RNA)** actúa como transportador de los aminoácidos. Durante la síntesis de proteínas cada aminoácido es llevado al ribosoma por su propio RNA de transferencia.

Haciendo un símil, en la construcción de una proteína el m-RNA sería el plano del arquitecto, el r-RNA sería el terreno sobre el cual se construye, y el t-RNA representaría a los operarios que llevan los ladrillos (aminoácidos) y los colocan según está especificado en el plano para «construir» finalmente una proteína.

4.5. UN DICCIONARIO MOLECULAR: EL CÓDIGO GENÉTICO

La secuencia de nucleótidos en la molécula de DNA viene a ser un alfabeto molecular de cuatro señales, las cuatro bases distintas que tiene esta molécula (T, A, C, G). Cuando la información del DNA pasa al RNA en la transcripción (transcribir: escribir en otra parte), el alfabeto sigue siendo de cuatro bases (U, A, C, G). Sólo hay una pequeña diferencia, una U sustituye a la T. Pero, para pasar esta información a las proteínas en la traducción (traducir: escribir en otro idioma) nos enfrentamos a un verdadero problema «lingüístico». El alfabeto molecular de las proteínas contiene 20 señales distintas, hay 20 aminoácidos diferentes que constituyen las proteínas. Un símil sería la traducción del morse (dos signos, el punto y la raya) al castellano (28 signos). Evidentemente, cada letra del alfabeto castellano tiene que estar representada por más de un signo del alfabeto morse, y conociendo la clave es posible descifrar los mensajes enviados en morse.

Del mismo modo, cada aminoácido está representado por más de una base. Después de muchas investigaciones, se logró establecer las correspondencias.

- ♦ Cada grupo de tres nucleótidos, que se llama un codón, constituye una palabra en el lenguaje de los ácidos nucleicos, y esta palabra es traducida por un aminoácido.
- ♦ El código genético constituye las reglas de correspondencia entre los codones y los aminoácidos. Viene a ser, por tanto, un diccionario molecular.

El establecer la relación entre codones y aminoácidos requirió mucho ingenio y un enorme trabajo experimental; en 1965 se terminó de descifrar el código genético (Figura 4.2).

PRIMERA BASE	SEGUNDA BASE				TERCERA BASE
	U	C	A	G	
U	fenilalanina	serina	tirosina	cisteína	U
	fenilalanina	serina	tirosina	cisteína	C
	leucina	serina	FIN	FIN	A
	leucina	serina	FIN	triptófano	G
C	leucina	prolina	histidina	arginina	U
	leucina	prolina	histidina	arginina	C
	leucina	prolina	glutamina	arginina	A
	leucina	prolina	glutamina	arginina	G
A	isoleucina	treonina	asparagina	serina	U
	isoleucina	treonina	asparagina	serina	C
	isoleucina	treonina	lisina	arginina	A
	metionina	treonina	lisina	arginina	G
G	valina	alanina	aspártico	glicocola	U
	valina	alanina	aspártico	glicocola	C
	valina	alanina	glutámico	glicocola	A
	valina	alanina	glutámico	glicocola	G

FIGURA 4.2. Tabla con el código genético. Cada tres bases, triplete o codón, del RNA tiene un significado para la síntesis de proteínas. En la figura se representa todas las combinaciones. Por ejemplo UUU = fenilalanina, CUC = Leucina.